



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

«Μελέτη της επίδρασης της μεθόδου διαχείρισης των απορροών στην
ανάπτυξη υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας»



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΡΥΦΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων

Επ. Καθηγητής Κατσούλας Νικόλαος

ΒΟΛΟΣ, 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 10936/1
Ημερ. Εισ.: 07-09-2012
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ
2012
ΤΡΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Μελέτη της επίδρασης της μεθόδου διαχείρισης των απορροών στην
ανάπτυξη υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας»**

ΤΡΥΦΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2012

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

N. Κατσούλας (Επιβλέπων)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Επ. Καθηγητής
Γεωργικές Κατασκευές

K. Κίττας (Μέλος)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής
Γεωργικές Κατασκευές

X. Λύκας (Μέλος)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λέκτορας
Εργαστήριο Ανθοκομίας

ΤΡΥΦΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

**«Μελέτη της επίδρασης της μεθόδου διαχείρισης των απορροών στην
ανάπτυξη υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας»**

LACEC ISBN no:

Περίληψη

Ο κλάδος των θερμοκηπιακών επιχειρήσεων στην Ελλάδα έχει μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης, αφού θεωρείται κλάδος με συγκριτικό πλεονέκτημα εξαιτίας των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών της. Τα τελευταία χρόνια όμως, οι επενδύσεις σε θερμοκηπιακές μονάδες στη χώρα μας παρουσιάζουν μια προοδευτική στασιμότητα λόγω του έντονου ανταγωνισμού στη διεθνή αγορά και του υψηλού κόστους παραγωγής προϊόντων εκτός εποχής σε περιοχές όπου οι κλιματικές συνθήκες δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές. Η μέθοδος της υδροπονίας και η σωστή διαχείριση των απορροών αποτελούν λύση ώστε να καθίστανται οι θερμοκηπιακές επιχειρήσεις ανταγωνιστικές και βιώσιμες.

Η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στα συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών στα θερμοκήπια, είναι μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνική, αφού η περίσσεια του νερού και η έκθεση των θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον μειώνεται δραστικά ή ελαχιστοποιείται. Όμως η μακροπρόθεσμη ανακύκλωση των απορροών έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση Na^+ και Cl^- στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα. Από προηγούμενη έρευνα έχει διαπιστωθεί ότι η συγκέντρωση Na^+ και Cl^- στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα μπορεί να προβλεφθεί από μοντέλα ισοζυγίου μάζας και από την παρακολούθηση της κατανάλωσης νερού από τα φυτά. Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση του μοντέλου όταν αυτό λειτουργεί ενσωματωμένο σε ένα σύστημα λήψης αποφάσεων για την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος σε κλειστό υδροπονικό σύστημα.

Έτσι, για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταχειρίσεις: α) ανοιχτό σύστημα, όπου η απορροή του θρεπτικού διαλύματος δεν ανακυκλώνονταν, β) κλειστό σύστημα όπου η απορροή του θρεπτικού διαλύματος ανακυκλωνόταν πλήρως και γ) ημίκλειστο σύστημα όπου η απορροή του θρεπτικού διαλύματος ανακυκλωνόταν όταν η συγκέντρωση Na^+ στο σύστημα ήταν μεγαλύτερη από 15mmol L^{-1} .

Για τη μελέτη της επίδρασης των μεταχειρίσεων έγιναν μετρήσεις της αύξησης των φυτών τομάτας στο κλειστό, ημίκλειστο και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα καθώς επίσης της θρέψης και παραγωγής των φυτών στα παραπάνω συστήματα. Τα φυτά τομάτας μεταφυτεύτηκαν στο θερμοκήπιο το Δεκέμβριο του 2010 και η περίοδος καλλιέργειας τερματίστηκε τον Ιούλιο του 2011 και αρδεύονταν με θρεπτικό διάλυμα το οποίο περιείχε 2mM NaCl προερχόμενο από το νερό άρδευσης. Κατά τη διάρκεια του βλαστικού σταδίου ανάπτυξης των φυτών, τα νεαρά φυτά τομάτας εκτίθονταν σε υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών στο περιβάλλον της ρίζας σε σχέση με αυτές που προτεινόνταν για τη βόρεια Ευρώπη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, η ηλεκτρική

αγωγιμότητα στη ζώνη της ρίζας για τα φυτά που καλλιεργούνταν στο κλειστό και ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα διατηρούνταν σε χαμηλά επίπεδα από ότι στη καλλιέργεια των φυτών με ελεύθερη απορροή (ανοιχτό σύστημα), για πολλές εβδομάδες μετά τη μεταφύτευση. Όμως σταδιακά η ηλεκτρική αγωγιμότητα EC στο κλειστό και ημίκλειστο σύστημα αυξανόταν σε υψηλότερα επίπεδα από ότι στο ανοιχτό εξαιτίας της συσσώρευσης Na^+ και Cl^- . Επίσης το μοντέλο υπολόγιζε με επιτυχία τη συγκέντρωση του Na^+ στο νερό της απορροής. Η ικανότητα του μοντέλου να ελαχιστοποιήσει την απόρριψη του θρεπτικού διαλύματος σε ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα και ως εκ τούτου να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματικότητα χρήσης νερού, είναι ακόμα υπό συζήτηση.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση των σπουδών μου, θα ήθελα να αναφερθώ στους ξεχωριστούς εκείνους ανθρώπους, οι οποίοι με βοήθησαν, με στήριξαν και τους εκφράζω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, στον Κο Κατσούλα Νικόλαο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη μελέτη των υδροπονικών καλλιεργειών και κατ' επέκταση με το γνωστικό αντικείμενο των Γεωργικών Κατασκευών, καθώς και για την αμέριστη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και τη συγγραφή του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Κο Κωνσταντίνο Κίττα Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος καθώς και τον Κο Χρήστο Λύκα Λέκτορα Ανθοκομίας του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τη συμμετοχή τους στη συμβουλευτική επιτροπή.

Ευχαριστώ επίσης τον Κακαβηκάκη Γεώργιο μεταπτυχιακό φοιτητή του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την πολύτιμη συνεισφορά του στη διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής, τον Γιαννακό Ηλία υπεύθυνο διαχείρισης του θερμοκηπίου στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου στο Βελεστίνο, καθώς επίσης και το συμφοιτητή μου Φυντανή Απόστολο για την ηθική και τεχνική υποστήριξη στην εκτέλεση του πειράματος.

Επιπλέον θα ήθελα να αναφέρω ότι η εργασία αυτή έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου Sirrimed, το οποίο υλοποιείται από το Κέντρο Έρευνας Τεχνολογίας και Ανάπτυξης Θεσσαλίας σε συνεργασία με το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, στο πλαίσιο των προγραμμάτων FP7.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και υλική στήριξη τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και τη συνεχή συμπαράστασή τους όλον αυτό τον καιρό.

Τρυφωνόπουλος Ιωάννης

Βόλος, 2012

Δήλωση: Δηλώνω υπεύθυνα ότι το παρόν κείμενο αποτελεί προϊόν προσωπικής μελέτης και εργασίας και πώς όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή της δηλώνονται σαφώς είτε στις παραπομπές είτε στο βιβλιογραφικό κατάλογο.

Υπογραφή

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 . Γενική Εισαγωγή	12
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	13
1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων	13
1.2 ΟΙ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ.....	14
1.2.1 Εισαγωγικές Έννοιες	14
1.2.2 Συστήματα Υδροπονικών Καλλιεργειών	15
1.2.3 Οφέλη και Προβλήματα Εφαρμογής της Υδροπονίας	18
1.2.4 Προβλήματα των Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών στην Ελλάδα	19
1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	20
1.3.1 Σκοπός της Εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2 . Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	23
2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ.....	23
2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	24
2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	25
2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ Na⁺ ΚΑΙ Cl⁻ ΣΤΗ ΤΟΜΑΤΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	25
Κεφάλαιο 3 . Υλικά και Μέθοδοι.....	27
3.1 ΤΟΠΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	27
3.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	27
3.3 ΑΕΡΙΣΜΟΣ	28
3.4 ΘΕΡΜΑΝΣΗ	28
3.5 Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ.....	28
3.6 ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΦΡΟΝΤΙΔΕΣ	30
3.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	30
3.8 ΤΟ ΘΡΕΠΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ.....	33
3.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	35
3.9.1 Φωτοσύνθεσης.....	35
3.9.2 Ύψους Φυτών.....	40
3.9.3 Φυλλικής επιφάνειας	40
3.9.4 Καταστροφικές	41
3.9.5 Παραγωγής	41
3.9.6 Κατανάλωση νερού και όγκος νερού απορροής.....	42

3.9.7 Υπολογισμός συγκέντρωσης Na ⁺	42
3.10 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	44
Κεφάλαιο 4 . Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	45
4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	45
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	46
4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	48
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	51
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ...	53
Κεφάλαιο 5 . Συμπεράσματα.....	57
Κεφάλαιο 6 . Βιβλιογραφία.....	59

Κεφάλαιο 1 . Γενική Εισαγωγή

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων

Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα αποτελεί έναν από δυναμικότερους κλάδους της γεωργίας, παρόλο ότι ο μεγάλος όγκος των θερμοκηπιακών επιχειρήσεων τεχνολογικά δεν βρίσκεται ακόμα σε υψηλό επίπεδο.

Ιδιαίτερα σήμερα με τα διάφορα διαρθρωτικά προβλήματα της Ελληνικής Γεωργίας οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες μπορούν να αποτελέσουν διέξοδο και ταυτόχρονα σημαντικό παράγοντα δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας ακόμη και για περιοχές οι οποίες παραδοσιακά έχουν σχέση μόνο με μεγάλες καλλιέργειες.

Σε παγκόσμια κλίμακα (πλην Κίνας) υπάρχουν, 2.500.000 στρ. θερμοκηπίων, από τα οποία τα 650.000 στρ. είναι υαλόφρακτα και τα 1.850.000 στρ. είναι με κάλυψη πλαστικού (πηγή: Εθνική Στατιστική Υπηρεσία). Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης υπάρχουν 1.200.000 στρ. ή 8% των θερμοκηπιακών εκτάσεων παγκοσμίως. Οι Μεσογειακές χώρες κατέχουν το 36.5% της παγκόσμιας καλυμμένης έκτασης σε θερμοκήπια με έκταση περίπου 1.200.000 στρέμματα. Στην Ελλάδα, η οποία καλύπτει το 1.4% της παγκόσμιας έκτασης και το 3.8% των μεσογειακών εκτάσεων σε θερμοκήπια, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980.

Στην Ελλάδα, η Κρήτη κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της καλυμμένης έκτασης σε θερμοκήπια με ποσοστό περίπου 40%. Σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας 2011 (www.statistics.gr) η συνολική έκταση των θερμοκηπίων στην Ελλάδα είναι 56.000 στρέμματα από τα οποία τα 50.000 καλλιεργούνται για παραγωγή λαχανικών και τα 6.000 για παραγωγή ανθοκομικών. Στα λαχανοκομικά, τις μεγαλύτερες εκτάσεις καλύπτουν η τομάτα και το αγγούρι καταλαμβάνοντας μερίδιο της τάξης του 80%, ενώ στα ανθοκομικά, τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλα, γαρύφαλλα κλπ) καλύπτουν συνολικά ποσοστό 65.5% του αντίστοιχου συνόλου.

Στη χώρα μας οι πρώτες συστηματικές εγκαταστάσεις θερμοκηπίων ξεκίνησαν το 1955 και αποτελούνταν από υαλόφρακτα θερμοκήπια για παραγωγή καλλωπιστικών φυτών. Η σημαντική όμως εξάπλωσή τους αρχίζει μετά το 1996, με τη χρησιμοποίηση του πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης των θερμοκηπίων. Η ευκολία προσαρμογής του υλικού αυτού σε οποιοδήποτε σχήμα σκελετού και η χαμηλή του τιμή επέτρεψαν στους καλλιεργητές να κατασκευάσουν μόνοι τους θερμοκήπια για παραγωγή πρώιμων κηπευτικών, χωρίς να απαιτούνται μεγάλα κεφάλαια.

Λαμβάνοντας υπόψη την δυναμική που έχει η Ελλάδα στη παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων, εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης, η δυνατότητα ανάκαμψης αυτού του κλάδου δεν αποτελεί ουτοπία. Για να αναπτυχθούν οι θερμοκηπιακές επιχειρήσεις και να επιβιώσουν οι ήδη υπάρχουσες, πρέπει να καταστούν ανταγωνιστικές μέσα από τη παραγωγή προϊόντων άριστης ποιότητας και με το ελάχιστο δυνατό κόστος, καθώς και με την υιοθέτηση και εφαρμογή των πιο αποτελεσματικών και πρωτοποριακών τεχνολογιών, όπου θα είναι παράλληλα φιλικές στο περιβάλλον.

Η αύξηση της ανταγωνιστικότητας των θερμοκηπιακών προϊόντων μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή της υδροπονίας. Η εφαρμογή της υδροπονίας, ενός γεωργικού συστήματος ακριβείας και ολοκληρωμένης διαχείρισης της παραγωγής, μέσα από τη χρήση νέων καλλιεργητικών πρακτικών και σύγχρονης τεχνολογίας παράγει καλής ποιότητας προϊόντα με ελάχιστο κόστος, ενώ συμβάλλει και στη προστασία του περιβάλλοντος (Μαυρογιαννόπουλος, 1994).

Η Ελλάδα διαθέτει όλους εκείνους τους παράγοντες που συντελούν στην αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων και είναι οι εξής:

Πολύ καλές εδαφοκλιματικές συνθήκες

Εύκολη πρόσβαση στις αγορές της Ευρώπης λόγω της γεωγραφικής της θέσης

Σημαντική τεχνογνωσία από εξειδικευμένα Εργαστήρια

Σημαντικές ποσότητες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τα συμβατικά καύσιμα.

1.2 ΟΙ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

1.2.1 Εισαγωγικές Έννοιες

Με την ευρεία έννοια του όρου, υδροπονία είναι η χρήση οποιασδήποτε μεθόδου καλλιέργειας φυτών που δεν σχετίζεται με το φυσικό έδαφος ή με μίγματα εδάφους. Αναφέρεται πολλές φορές και ως τεχνητή καλλιέργεια και ανέδαφος γεωργία.

Με τη μέθοδο της υδροπονίας τα φυτά καλλιεργούνται είτε πάνω σε πορώδη αδρανή υποστρώματα στα οποία προστίθεται θρεπτικό διάλυμα είτε σε σκέτο θρεπτικό διάλυμα. Το θρεπτικό διάλυμα είναι ένα αραιό υδατικό διάλυμα όλων των θρεπτικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για τα φυτά. Τα θρεπτικά διαλύματα πρέπει να περιέχουν όλα τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα για την

ανάπτυξη των φυτών, εκτός από τον άνθρακα ο οποίος προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα.

Ως υπόστρωμα υδροπονικών καλλιεργειών μπορεί να θεωρηθεί κάθε φυσικό ή προερχόμενο από βιομηχανική επεξεργασία πορώδες υλικό, εκτός από το φυσικό χώμα, το οποίο χάρις στην ύπαρξη των πόρων είναι σε θέση να συγκρατεί νερό (θρεπτικό διάλυμα) και αέρα σε κατάλληλες για την ανάπτυξη των φυτών αναλογίες, με αποτέλεσμα να μπορεί να αντικαθιστά το έδαφος ως μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος. Τα περισσότερα υποστρώματα υδροπονίας είναι χημικά αδρανή υλικά στις συνηθισμένες συνθήκες καλλιέργειας. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά δεν αποδίδουν θρεπτικά στοιχεία στο θρεπτικό διάλυμα ούτε δεσμεύουν ιόντα που υπάρχουν ήδη σε αυτό.

Η καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε **ανοιχτά** είτε σε **κλειστά συστήματα**. Τα ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους είναι πάντοτε συστήματα καλλιέργειας σε υποστρώματα. Λόγω της πορώδους φύσης τους, τα υποστρώματα συγκρατούν σημαντικές ποσότητες θρεπτικού διαλύματος. Από τον συνολικό όγκο του διαλύματος που παρέχεται στην καλλιέργεια, το ποσοστό που δεν συγκρατείται στο υπόστρωμα αλλά απορρέει καλείται **θρεπτικό διάλυμα απορροής ή διάλυμα απορροής**. Όταν το διάλυμα απορροής δεν συλλέγεται αλλά απορρίπτεται στο περιβάλλον, το σύστημα καλλιέργειας καλείται ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Αντίστοιχα, κλειστό υδροπονικό σύστημα καλείται εκείνο στο οποίο το διάλυμα απορροής που απομακρύνεται από το χώρο των ριζών συλλέγεται, συμπληρώνεται με νερό και θρεπτικά στοιχεία και στη συνέχεια χορηγείται ξανά στα φυτά με τη βοήθεια μιας αντλίας. Συνήθως, στα κλειστά υδροπονικά συστήματα υπάρχει και ένα σύστημα απολύμανσης του διαλύματος απορροής.

1.2.2 Συστήματα Υδροπονικών Καλλιεργειών

Έχουν επινοηθεί και δοκιμαστεί διάφορα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους, πολλά από τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Οι διαφορές αυτές σχετίζονται κυρίως με τη φύση και τα χαρακτηριστικά του μέσου στο οποίο αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών, τον τρόπο παροχής νερού και θρεπτικών στοιχείων στα φυτά, καθώς και με τα υλικά και την αρχιτεκτονική της κατασκευής τους. Ο τρόπος ταξινόμησης που χρησιμοποιείται βασίζεται στο μέσο ανάπτυξης του

ριζικού συστήματος, το οποίο λαμβάνεται ως κύριο κριτήριο, καθώς και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος καλλιέργειας, τα οποία αποτελούν τα δευτερεύοντα κριτήρια διάκρισης. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, παρουσιάζονται τα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους παρακάτω.

Καλλιέργεια σε στάσιμο θρεπτικό διάλυμα. Τα φυτά αναπτύσσονται είτε σε μικρά ατομικά δοχεία είτε, πιο συχνά, σε μεγάλες λεκάνες καλλιέργειας οι οποίες είναι γεμισμένες με θρεπτικό διάλυμα κατάλληλης σύστασης. Τα φυτά υποστρώνονται με ένα πλέγμα πάνω από τις λεκάνες καλλιέργειας. Το θρεπτικό διάλυμα που καταναλώνεται από τα φυτά συμπληρώνεται τακτικά με προσθήκη νέου διαλύματος. Το σύστημα αυτό βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη πράξη διότι παρουσιάζει αρκετά προβλήματα, με πιο σημαντικό τη δυσκολία αερισμού και οξυγόνωσης των ριζών.

Σύστημα επίπλευσης. Σε αυτό το σύστημα καλλιέργειας, τα φυτά τοποθετούνται πάνω σε πλάκες από πολύ ελαφρύ υλικό, οι οποίες φέρουν οπές σε προκαθορισμένες αποστάσεις. Μέσω αυτών των οπών διέρχονται οι ρίζες των φυτών, οι οποίες αναπτύσσονται κάτω από αυτές. Οι πλάκες τοποθετούνται πάνω σε θρεπτικό διάλυμα που περιέχεται μέσα σε ειδικές λεκάνες καλλιέργειας και παραμένουν εκεί ως επιπλέουσες λόγω του μικρού ειδικού βάρους τους. Το ύψος του θρεπτικού διαλύματος μέσα στη λεκάνη ανέρχεται σε 15 – 20 cm τουλάχιστον. Στη πράξη, το σύστημα επίπλευσης εφαρμόζεται κυρίως για μικρής καλλιεργητικής διάρκειας και μικρού μεγέθους φυτά τα οποία συγκομίζονται εφάπαξ, όπως π.χ. το μαρούλι.

Καλλιέργεια σε ρηχό ρεύμα θρεπτικού διαλύματος (NFT). Το NFT είναι μια υδροπονική μέθοδος καλλιέργειας στην οποία οι ρίζες των φυτών αναπτύσσονται μέσα σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα το οποίο όμως ρέει συνεχώς, σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα συστήματα καλλιέργειας. Για να επιτυγχάνεται καλή οξυγόνωση του ριζικού συστήματος, το βάθος του ρέοντος θρεπτικού διαλύματος μέσα στα κανάλια δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 2 – 4 mm. Για να είναι δυνατή η ροή του διαλύματος μέσα στα κανάλια, θα πρέπει να έχουν κατά μήκος μια μικρή κλίση γύρω στο 1 – 2%. Σε όλες τις εκδοχές ενός συστήματος NFT, υπάρχει ένα δοχείο (δεξαμενή) παροχής θρεπτικού διαλύματος. Από τη δεξαμενή αυτή, το θρεπτικό διάλυμα μεταφέρεται με τη βοήθεια μια αντλίας στα κανάλια που φέρουν τα φυτά. Το δοχείο παροχής θρεπτικού διαλύματος είναι ταυτόχρονα και το δοχείο συλλογής των απορροών, αφού σε αυτό καταλήγει το θρεπτικό διάλυμα που επιστρέφει από τα κανάλια.

Αεροπονία. Η αεροπονία είναι μια παραλλαγή της υδροπονίας και ειδικότερα των συστημάτων καλλιέργειας σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα χωρίς τη χρήση υποστρώματος. Στις αεροπονικές μεθόδους καλλιέργειας το θρεπτικό διάλυμα ψεκάζεται με ακροφύσια

πάνω στο ριζικό σύστημα που αιωρείται μέσα σε κενά κιβώτια ή επιμήκεις σωλήνες, έτσι ώστε ο χώρος να είναι συνεχώς κορεσμένος σε υγρασία. Με αυτόν τον τρόπο η ρίζα του φυτού παραμένει συνεχώς υγρή και μπορεί να απορροφά από το διάλυμα που ψεκάζεται πάνω της τις απαιτούμενες ποσότητες νερού και θρεπτικών στοιχείων. Κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία μιας αεροπονικής καλλιέργειας είναι το μέγεθος της ψεκαζόμενης σταγόνας το οποίο θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 40 – 50 μm (0,04 – 0,05 mm). Η συχνότητα ψεκασμού συνήθως ανέρχεται σε 2 – 3 min ενώ η διάρκεια σε μερικά δευτερόλεπτα.

Καλλιέργεια εκτός εδάφους σε σάκους. Συνήθως οι σάκοι είναι κατασκευασμένοι από μαλακό πολυαιθυλένιο λευκού χρώματος. Συχνά η εσωτερική τους επιφάνεια είναι μαύρη με στόχο να παρεμποδίζεται η διέλευση του φωτός στο εσωτερικό τους. Το υλικό (υπόστρωμα) με το οποίο γεμίζονται οι σάκοι μπορεί να αποτελείται είτε από ασύνδετους μεταξύ τους κόκκους, όπως η άμμος, ο περλίτης, η ελαφρόπετρα κ.λπ., είτε από ινώδη επιμήκη τεμαχίδια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μια σταθερού σχήματος πορώδη πλάκα, όπως ο πετροβάμβακας και η πολυουρεθάνη. Κατά κανόνα οι σάκοι έχουν μήκος 1m και πλάτος 15 – 20 cm όταν χρησιμοποιούνται για φύτευση σε μονή σειρά, ή παραπάνω όταν πρόκειται για φύτευση σε διπλή ή πολλαπλή σειρά. Οι γεμισμένοι με υπόστρωμα σάκοι τοποθετούνται πάνω σε πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης ή μέσα σε υδρορροές. Συχνά οι υδρορροές δεν τοποθετούνται απευθείας στο δάπεδο του θερμοκηπίου αλλά πάνω σε κατάλληλα υποστηρίγματα ή πάγκους έτσι ώστε να διευκολύνονται οι καλλιεργητικές εργασίες. Η καλλιέργεια εκτός εδάφους σε σάκους είναι διεθνώς η πιο διαδεδομένη μέθοδος καλλιέργειας φυτών σε υποστρώματα. Η πιο συνηθισμένη μορφή καλλιέργειας σε σάκους είναι η καλλιέργεια σε τυποποιημένους σάκους πετροβάμβακα. Στην Ελλάδα, εκτός από τον πετροβάμβακα, για καλλιέργεια σε σάκους χρησιμοποιούνται επίσης ο περλίτης και η ελαφρόπετρα.



Εικόνα 1. 1 Φυτά τομάτας τα οποία καλλιεργούνται σε σάκους με περλίτη.



Εικόνα 1.2 Καλλιέργεια τομάτας σε σάκους με πετροβάμβακα

1.2.3 Οφέλη και Προβλήματα Εφαρμογής της Υδροπονίας

Το μεγαλύτερο όφελος της υδροπονικής καλλιέργειας είναι η ριζική αντιμετώπιση των εδαφογενών ασθενειών. Η καλλιέργεια εκτός εδάφους καθιστά περιττή την απολύμανση του εδάφους με τη χρήση χημικών ουσιών. Συνεπώς οι καλλιέργειες εκτός εδάφους είναι απαλλαγμένες από την παρουσία παθογόνων στο ριζικό περιβάλλον, όταν πραγματοποιούνται είτε σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα είτε σε υπόστρωμα που χρησιμοποιείται για πρώτη φορά. Επιπλέον, η υδροπονία δίνει τη δυνατότητα υψηλών

παραγωγών αποκλείοντας υποβαθμισμένα και άγονα εδάφη, καθώς και εδάφη που παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αλάτωσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα των υδροπονικών καλλιεργειών είναι η μείωση του κόστους θέρμανσης λόγω της κάλυψης του εδάφους η οποία οδηγεί σε μειωμένη εξάτμιση νερού και συνεπώς στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Μειωμένο κόστος θέρμανσης προκύπτει επίσης και από το γεγονός ότι οι υδροπονικές καλλιέργειες δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του εδάφους του θερμοκηπίου. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η σημαντική πρωίμιση της παραγωγής που οφείλεται κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες που μπορούν να διατηρηθούν στο περιβάλλον των ριζών. Επιπλέον, η καλλιέργεια των φυτών εκτός εδάφους απαλλάσσει τον παραγωγό από τις δαπάνες της κατεργασίας του εδάφους (όργωμα, φρεζάρισμα, κ.λπ.) και μειώνονται οι ανάγκες σε εργατικά. Σημαντικό πλεονέκτημα της υδροπονίας είναι και η δυνατότητα βελτιστοποίησης της θρέψης των φυτών, αφού αυτή πραγματοποιείται μέσω της παροχής θρεπτικών διαλυμάτων με πλήρως ελεγχόμενη σύνθεση.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα, η υδροπονία παρουσιάζει και ορισμένα προβλήματα. Το σημαντικότερο είναι το υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης μιας υδροπονικής μονάδας σε αντίθεση με το κόστος για μια καλλιέργεια που εγκαθίστανται στο έδαφος. Ένα άλλο μειονέκτημα των υδροπονικών καλλιεργειών είναι η ταχύτερη εμφάνιση των επιδράσεων ενός λανθασμένου χειρισμού στα φυτά. Τέλος, πρόβλημα αποτελεί και ο αυξημένος κίνδυνος εξάπλωσης παθογόνων στα κλειστά συστήματα αλλά βέβαια το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μέσω της εφαρμογής κάποιας μεθόδου απολύμανσης του θρεπτικού διαλύματος.

1.2.4 Προβλήματα των Θεροκηπιακών Καλλιεργειών στην Ελλάδα

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες αποτελούν μια δυναμική έκφραση της πρωτογενούς παραγωγής. Η παραγωγή όμως των προϊόντων υπό κάλυψη στην Ελλάδα, παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα των θερμοκηπίων, δεν έχει φθάσει ακόμη στη μέγιστη δυνατή ανάπτυξη. Η επέκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανταγωνισμό με τις υπαίθριες, πρώιμες και όψιμες καλλιέργειες και με τις εισαγωγές προϊόντων. Λόγω των ήπιων κλιματικών συνθηκών που επικρατούν τόσο στην Ελλάδα όσο και στις άλλες μεσογειακές χώρες από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο, επιτρέπουν την παραγωγή κηπευτικών στην ύπαιθρο, τα οποία ανταγωνίζονται τα αντίστοιχα θερμοκηπιακά κατά την ίδια περίοδο.

Επιπλέον, τα περισσότερα ελληνικά θερμοκήπια είναι υποτυπωδώς εξοπλισμένα (δεν θερμαίνονται, μη σωστός αερισμός), με αποτέλεσμα τη δημιουργία μη ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων ιδιαίτερα κατά τη θερμή περίοδο του έτους από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο. Επίσης το υψηλό κόστος θέρμανσης και κατασκευής θερμαινόμενων θερμοκηπίων είναι ακόμα δύο παράγοντες που συμβάλλουν στη παραγωγή προϊόντων χαμηλής ποιότητας με αποτέλεσμα τη δύσκολη διάθεσή τους στις αγορές.

Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα συγκεντρώνονται σε περιοχές χωρίς υπερβολικά ψυχρό χειμώνα και με άφθονη ηλιακή ενέργεια. Η Κρήτη, η Πελοπόννησος και τα νησιά του Νοτίου Αιγαίου είναι οι περιοχές όπου συγκεντρώνεται το 65% των θερμοκηπίων της χώρας. Κατά συνέπεια, παρά τις ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες της χώρας μας, το κλίμα που δημιουργείται τελικά, μέσα στα θερμοκήπια απέχει πολύ από το βέλτιστο και είναι ακατάλληλο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών για μεγάλο χρονικό διάστημα του έτους. Η υψηλή θερμοκρασία και τα μεγάλα φορτία ακτινοβολίας που εμφανίζονται από την Άνοιξη μέχρι νωρίς το Φθινόπωρο οδηγούν σε υπερθερμάνσεις στο εσωτερικό των θερμοκηπίων και προκαλούν υδατική καταπόνηση στις καλλιέργειες.

Υπάρχουν τεχνολογίες κατάλληλες για μεσογειακά θερμοκήπια οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν από τους καλλιεργητές με σημαντικό όφελος στη παράταση της καλλιεργητικής περιόδου τη θερμή περίοδο του έτους, την αύξηση της ποσότητας και ποιότητας της παραγωγής και την εξοικονόμηση ενέργειας. Διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των υπερθερμάνσεων κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου είναι η σκίαση και ο φυσικός αερισμός, η αποτελεσματικότητά τους όμως είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό έχουν εφαρμοσθεί και άλλες τεχνολογίες όπως είναι ο δροσισμός με εξάτμιση. Τα συστήματα δροσισμού με εξάτμιση βασίζονται στη μετατροπή της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα είτε μέσω της απευθείας παροχής νερού στην ατμόσφαιρα είτε με ψύξη του αέρα με διέλευσή του μέσα από υγρή παρειά.

1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σε όλες τις υδροπονικές καλλιέργειες το νερό και τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία (λιπάσματα) τροφοδοτούνται μαζί στη ρίζα των φυτών.

Η διάθεση του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο με δύο τρόπους:

- α) με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος ή κλειστό σύστημα, και
- β) χωρίς ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος ή ανοικτά συστήματα.

Στα κλειστά συστήματα όλα τα στοιχεία που παρέχονται με το θρεπτικό διάλυμα ή απορροφώνται από το ριζικό σύστημα των φυτών ή παραμένουν στο διάλυμα αυξάνοντας συνεχώς την αλατότητά του. Για το λόγο αυτό σε αυτά τα συστήματα απαιτείται καλύτερης ποιότητας νερό από ό,τι στα ανοιχτά, διότι τα άχρηστα ιόντα που πιθανόν περιέχει το νερό δεν απορρίπτονται αλλά συσσωρεύονται στο διάλυμα. Λόγω πιθανής συσσώρευσης ιόντων στο διάλυμα, στα κλειστά συστήματα απαιτείται να γίνονται συχνότερες αναλύσεις του θρεπτικού διαλύματος καθώς και μεγαλύτερη προσοχή κατά τη παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων. Επιπλέον, λόγω της συνεχούς ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος υπάρχει πρόβλημα εξάπλωσης μόλυνσης των φυτών από παθογόνα. Παθογόνοι μικροοργανισμοί οι οποίοι βρίσκονται στο θρεπτικό διάλυμα μέσω του κλειστού συστήματος υδροπονίας είναι δυνατόν να προσβάλλουν μεγάλο αριθμό φυτών εφόσον το διάλυμα ανακυκλώνεται συνεχώς. Ένα ακόμη πρόβλημα οικονομικής φύσεως της χρήσης κλειστού υδροπονικού συστήματος είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης. Απαιτείται εγκατάσταση συστήματος ανακύκλωσης του θρεπτικού διαλύματος καθώς επίσης και διαχείρισης των απορροών ως προς το pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).

Στα ανοικτά συστήματα το θρεπτικό διάλυμα που στραγγίζει μετά την τροφοδοσία των φυτών απορρίπτεται στο περιβάλλον δημιουργώντας πρόβλημα ρύπανσης λόγω των χημικών στοιχείων που περιέχει. Επίσης, οι απώλειες χημικών στοιχείων στα ανοικτά υδροπονικά συστήματα είναι μεγαλύτερες των κλειστών και περίπου ίδιες με αυτές των αρδευόμενων καλλιεργειών εδάφους. Ως εκ τούτου τα ανοικτά συστήματα απαιτούν μεγάλη κατανάλωση νερού και ιόντων χωρίς να γίνεται πλήρη αξιοποίησή τους. Επιπλέον, στα ανοικτά συστήματα για να αποφύγουμε πρόσκαιρη έλλειψη θρεπτικών στοιχείων στο ριζικό σύστημα και σπατάλη νερού και θρεπτικών, η συχνότητα άρδευσης θα πρέπει να είναι σε άμεση σχέση με το ρυθμό απορρόφησης του νερού και των θρεπτικών από τη ρίζα. Επομένως η σωστή ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης στα ανοιχτά συστήματα είναι μεγαλύτερης σπουδαιότητας.

1.3.1 Σκοπός της Εργασίας

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση του μοντέλου όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της συγκέντρωσης παροχής των θρεπτικών στοιχείων και την ελαχιστοποίηση απόρριψης του νερού απορροής εφαρμόζοντας ένα σύστημα λήψης

αποφάσεων για καλλιέργεια τομάτας εφαρμόζοντας κλειστό σύστημα υδροπονίας. Επιπλέον σκοπός αυτής της εργασίας είναι να συγκρίνει την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών τομάτας μεταξύ του κλειστού, ημίκλειστου και ανοικτού υδροπονικού συστήματος.

Μετά τη γενική εισαγωγή που προηγήθηκε για τον κλάδο των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στη χώρα μας (Κεφάλαιο 1) στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα συστήματα των υδροπονικών καλλιεργειών που εφαρμόζονται σήμερα παραθέτοντας τα προβλήματα και τα οφέλη της εφαρμογής τους. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση από διεθνείς έρευνες στο τομέα των υδροπονικών καλλιεργειών με έμφαση στη διαχείριση των απορροών και την ανάπτυξη μοντέλων για το συσχετισμό των συγκεντρώσεων Na^+ και Cl^- στο περιβάλλον της ρίζας και των αντίστοιχων ιόντων στο νερό άρδευσης που προσλαμβάνουν τα φυτά. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται όλα τα υλικά και οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για τη σωστή και ολοκληρωμένη εκτέλεση του πειράματος. Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και που αφορούν την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών της τομάτας στα τρία διαφορετικά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας. Τέλος στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτείνονται λύσεις για την βελτιστοποίηση της ανάπτυξης ενός συστήματος διαχείρισης των απορροών σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ

Σε πολλές περιοχές με εντατικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες η διαθεσιμότητα καλής ποιότητας νερού ελαχιστοποιείται. Ως εκ τούτου η συνεχής απαίτηση για νερό άρδευσης οδηγεί τους καλλιεργητές στη χρήση υφάλμυρου νερού το οποίο προκαλεί σταδιακή συσσώρευση αλάτων Na^+ και Cl^- στη ζώνη της ρίζας του φυτού με επιζήμια για το φυτό αποτελέσματα στην αύξηση και τη παραγωγή (Flowers, 1999; Sonneveld, 2000).

Η αντίδραση των φυτών στη συσσώρευση αλάτων στη ζώνη της ρίζας περιλαμβάνει το περιορισμό της φωτοσύνθεσης και τη μείωση της διαπνοής εξαιτίας του κλεισίματος των στοματίων (Yeo et al., 1985; Pasternak, 1987). Πολλά είδη φυτών αντιδρούν με παρόμοιους περιορισμούς ανάπτυξης σε επίπεδα χαμηλής ή μέτριας αλατότητας στο νερό άρδευσης με μείωση της παραγωγής ανεξάρτητα από την αιτία προέλευσης της αλατότητας (Adams, 1991; Savvas and Lenz, 2000). Αυτή η αναστολή της ανάπτυξης κάτω από συνθήκες αλατότητας υποδηλώνει μια προσαρμογή των φυτών στον περιορισμό της διαθεσιμότητας του νερού λόγω του μειωμένου οσμωτικού δυναμικού στο περιβάλλον της ρίζας (Pasternak, 1987; Sonneveld, 2000).

Μερικοί ερευνητές αναφέρουν ότι η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), η οποία λειτουργεί ως δείκτης της αλατότητας του νερού άρδευσης, μπορεί να μειώσει τη φωτοσύνθεση και κατά συνέπεια την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Schwartz, 2002).

Η πιπεριά είναι ένα σημαντικό καλλιεργούμενο φυτό στα θερμοκήπια σε όλη την Ευρώπη το οποίο θεωρείται γενικά ευαίσθητο στην αλατότητα (Maas and Hoffman, 1977; Navarro et al., 2002). Τελευταία έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εργασίες για τη συμπεριφορά της πιπεριάς κάτω από συνθήκες αλατότητας (Chartzoulakis and Klapaki, 2000; Navarro et al., 2002; De Pascale et al., 2003). Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών έδειξαν ότι η καθαρή φωτοσύνθεση και η στοματική αγωγιμότητα επηρεάζονται δυσμενώς από την υψηλή συγκέντρωση αλάτων (De Pascale et al., 2003). Οι Lycoskoufis et al. 2004 έδειξαν πως σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα μειώνεται η καθαρή φωτοσύνθεση καθώς επίσης και η περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη περισσότερο όταν όλη η ρίζα ήταν εκτεθειμένη σε υψηλή αλατότητα σε αντίθεση όταν ήταν εκτεθειμένη η μισή. Ο ρυθμός διαπνοής και η

στοματική αγωγιμότητα μειώθηκαν το ίδιο ανεξάρτητα από το μέρος της ρίζας που ήταν εκτεθειμένο σε άλατα.

Οι van de Sanden and Veen, 1992 βρήκαν μια μικρή αύξηση στη καθαρή φωτοσύνθεση φύλλων αγγουριάς με αύξηση της αλατότητας σε επίπεδα EC άνω των 8 dS m⁻¹.

Το πρόγραμμα άρδευσης ασκεί επιρροή στο περιβάλλον της ρίζας συμπεριλαμβάνοντας το υδατικό δυναμικό και τη συσσώρευση αλάτων τα οποία επηρεάζουν την ανάπτυξη και τη φωτοσύνθεση των φυτών τομάτας (Campbell, 1986; Atherton and Rudich, 1986). Το άριστο πρόγραμμα άρδευσης θα μεγιστοποιήσει τη φωτοσύνθεση συμβάλλοντας στην υψηλή παραγωγή καρπών. Οι Xu et al. 1995, υπολόγισαν τη καθαρή φωτοσύνθεση φύλλων τομάτας σε τρία διαφορετικά υποστρώματα και βρήκαν για το πετροβάμβακα για EC θρεπτικού διαλύματος 4 dS m⁻¹ ρυθμό φωτοσύνθεσης 21,8 μmol.m⁻².s⁻¹ και για EC 2,5 dS.m⁻¹ φωτοσύνθεση 19,1 μmol.m⁻².s⁻¹.

2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Τα πιο πολλά λαχανικά είναι ευαίσθητα ή μέτρια ευαίσθητα στην αλατότητα με την παραγωγή να μειώνεται σε μέτρια επίπεδα αλατότητας στη ζώνη της ρίζας (Maas and Hoffman, 1977). Για να αποφευχθεί η μείωση παραγωγής, στην υιοθέτηση κλειστού συστήματος υδροπονίας στη Ν. Ισπανία, απαιτείται περιοδική απόρριψη του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος έτσι ώστε να διατηρείται η αλατότητα στη ζώνη της ρίζας κάτω από τα κρίσιμα επίπεδα (Magan et al., 2005). Σε γενικές γραμμές η παραγωγή τομάτας επηρεάζεται από την αύξηση της αλατότητας σύμφωνα με το μοντέλο των Maas and Hoffman (Maas and Hoffman, 1977) με γραμμική μείωση όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα ξεπεράσει το άριστο επίπεδο. Η παραγωγή εκφράζεται ως ποσοστό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y_r = 100 - s(EC_e - EC_t)$$

Όπου s το ποσοστό μείωσης της παραγωγής ανά μονάδα αύξησης της αλατότητας πάνω από το άριστο επίπεδο και

EC_t η μέγιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα στη ζώνη της ρίζας του φυτού χωρίς μείωση της παραγωγής. Οι Magan et al. (2003) πραγματοποίησαν πείραμα με τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις με πέντε ή επτά επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνολική παραγωγή καρπών τομάτας μειώθηκε σημαντικά με αύξηση της EC για κάθε μία από τις τρεις μεταχειρίσεις. Η παραγωγή παρέμενε σταθερή όταν το επίπεδο της EC κυμαινόταν μεταξύ 3 και 4 dS.m⁻¹ και στη συνέχεια μειωνόταν γραμμικά με επιπλέον αύξηση της EC. Το κρίσιμο επίπεδο EC για τη συνολική παραγωγή καρπών και για τις τρεις μεταχειρίσεις ήταν 3.6, 3.1 και 2.9 dS.m⁻¹ με μέσο όρο 3.2 dS.m⁻¹.

Το βάρος των καρπών καθώς και ο αριθμός τους επηρεάζεται και μειώνεται γραμμικά με αύξηση της αλατότητας. Τα αποτελέσματα της αλατότητας στο βάρος των καρπών στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά στον αριθμό των καρπών. Οι Sonneveld and Welles (1988), Li et al. (2001) and Eltez et al. (2002) αναφέρουν ότι ο αριθμός των καρπών δεν επηρεάζεται από μέτρια επίπεδα αλατότητας. Επιπλέον, η μείωση του αριθμού των καρπών φαίνεται να σχετίζεται και με τη μείωση του αριθμού των ανθέων ανά φυτό με αύξηση της αλατότητας (Magan, 2005).

2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Η αλατότητα προκαλεί μείωση της ανάπτυξης των φύλλων. Παρόμοια αποτελέσματα μείωσης της ανάπτυξης των φύλλων με την αύξηση των αλάτων στη ζώνη της ρίζας έχουν αναφερθεί για το αγγούρι (Van de Sanden and Veen, 1992), για την τομάτα (Taleisnik, 1987; McCall and Atherton, 1995) και για τη φράουλα (Awang et al., 1993).

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ Na⁺ ΚΑΙ Cl⁻ ΣΤΗ ΤΟΜΑΤΑ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα προβλήματα αλατότητας στα κλειστά υδροπονικά συστήματα προέρχονται κυρίως από τη συσσώρευση Na⁺ και Cl⁻ στο νερό της άρδευσης (Massa et al., 2008). Οι Sonneveld et al. (1999) εγκατέστησαν ένα μοντέλο συσχετισμού μεταξύ των συγκεντρώσεων Na⁺ και Cl⁻ στο περιβάλλον της ρίζας και των αντίστοιχων ιόντων στο νερό άρδευσης που προσλαμβάνουν τα φυτά. Οι Savvas et al. (2005, 2007, 2008) εγκατέστησαν παρόμοιο μοντέλο για το αγγούρι, το φασόλι και τη πιπεριά αλλά αυτό βασίστηκε σε δεδομένα που προέρχονταν από προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης όταν τα φυτά βρίσκονταν σε στάδιο παραγωγής.

Όσον αφορά την τομάτα λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες που αναφέρονται στις συγκεντρώσεις πρόσληψης Na⁺ και Cl⁻ και τη σχέση αυτών με τη συσσώρευση αλάτων

στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Carmassi et al. (2005) χρησιμοποίησε μια γραμμική σχέση για να περιγράψει τη πρόσληψη του Na^+ ως συνάρτηση της συγκέντρωσης Na^+ στη ζώνη της ρίζας σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας. Όμως οι Sonneveld et al. (1999) και Savvas et al. (2007) έδειξαν ότι η σχέση αυτή μπορεί να περιγραφεί με περισσότερη ακρίβεια μέσω εκθετικών συναρτήσεων. Massa et al. (2008) επίσης βρήκαν εκθετική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του Na^+ που προσλαμβάνουν τα φυτά τριανταφυλλιάς με τη συγκέντρωση του Na^+ στη ζώνη της ρίζας.

Οι Savvas et al. (2007) χρησιμοποίησαν ένα εμπειρικό μοντέλο το οποίο βαθμονομήθηκε και μπορεί να ενσωματωθεί στο διαδίκτυο ως ένα σύστημα λήψης αποφάσεων στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της συγκέντρωσης παροχής των θρεπτικών και στην ελαχιστοποίηση απόρριψης του νερού απορροής στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Αξιολογήθηκαν δύο μοντέλα το ένα γραμμικό και το άλλο εκθετικό. Το γραμμικό μοντέλο ήταν ακατάλληλο για το Cl^- διότι δεν λάμβανε υπόψη το Na^+ παρά μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το εκθετικό μοντέλο μπορούσε να προσομοιώσει αποτελεσματικά τη πρόσληψη του Na^+ για τα διάφορα επίπεδά του στη ζώνη της ρίζας με εύρος από 0,3 – 170 mol m⁻³. Η εγκυρότητα του εκθετικού μοντέλου ήταν ικανοποιητική για συγκεντρώσεις Cl^- από 0,3 – 155 mol m⁻³ στη ζώνη της ρίζας. Η αύξηση της συγκέντρωσης NaCl πάνω από 19 mol m⁻³ στο ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα σε καλλιέργεια τομάτας, η οποία θεωρείται η μέγιστη αποδεκτή, θα επιβάλλει συγκεντρώσεις τόσο υψηλές όσο 0,53 mol m⁻³ για το Na^+ και 0,71 mol m⁻³ για το Cl^- .

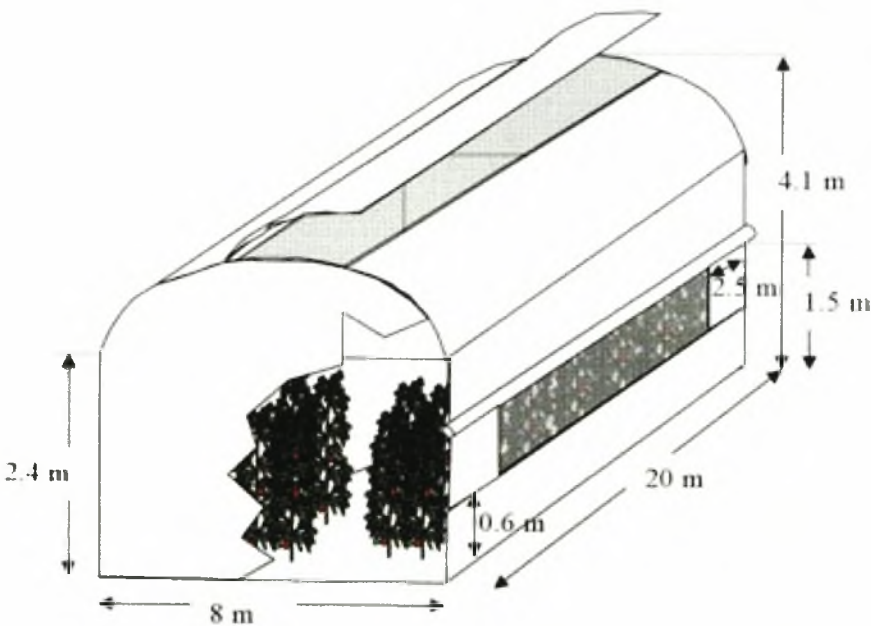
Κεφάλαιο 3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1 ΤΟΠΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ένα από τα τρία θερμοκήπια του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που βρίσκονται στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου στο Βελεστίνο. Το αγρόκτημα βρίσκεται σε γεωγραφικό μήκος 22° 44' και γεωγραφικό πλάτος 39° 22' και το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m. Η απόστασή του από το Βόλο είναι 17 km.

3.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Το θερμοκήπιο, στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις, ήταν κατασκευασμένο από γαλβανισμένο χάλυβα και καλυμμένο από πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου (τύπου PE-EVA-film TUV 3945, Plastika Kritis S.A.). Το θερμοκήπιο είχε προσανατολισμό Βορρά-Νότο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου ήταν τα ακόλουθα: ύψος κορυφιά 4,1 m, ύψος ορθοστάτη 2,4 m, ολικό πλάτος 8 m και ολικό μήκος 20 m. Η καλλυμένη επιφάνεια εδάφους (εμβαδόν) ήταν 160 m² (20 m * 8 m) και καταλάμβανε όγκο 572 m³. Ο τύπος του θερμοκηπίου ήταν τροποποιημένο τοξωτό. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά το πειραματικό θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.



Σχήμα 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πειραματικού θερμοκηπίου.

3.3 ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με πλευρικά παράθυρα κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών του και σε απόσταση 0,6m πάνω από το έδαφος. Η μέγιστη ανοικτή επιφάνεια για τα δύο πλαϊνά παράθυρα ήταν 27m² (15m μήκος * 0,9m ύψος ανοίγματος). Επιπλέον, το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο και με ένα παράθυρο οροφής με μέγιστη επιφάνεια ανοίγματος 18m². Όλα τα παράθυρα του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα, μέσω αισθητήρων που συνδέονταν με ηλεκτρονικό υπολογιστή, και άνοιγαν σε διάφορα επίπεδα όταν η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου ξεπερνούσε τους 21°C.

3.4 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Το σύστημα θέρμανσης του θερμοκηπίου αποτελούνταν από πλαστικούς σωλήνες θέρμανσης (PVC) τοποθετημένοι πάνω από το έδαφος και δίπλα στο υπόστρωμα των φυτών. Επίσης, υπήρχε και ένα αερόθερμο τοποθετημένο 2,6m πάνω από το έδαφος στη βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου. Με τη χρήση του συστήματος θέρμανσης διατηρούσαμε τη θερμοκρασία στους 13°C κατά τη διάρκεια της νύχτας και στους 17°C κατά τη διάρκεια της ημέρας.

3.5 Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Για τη διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκε καλλιέργεια ντομάτας (*Lycopersicon esculentum*, cv. Belladonna) και η μεταφύτευση των φυτών πραγματοποιήθηκε στις 23 Δεκεμβρίου 2010 και παρέμεινε στο θερμοκήπιο μέχρι τα μέσα Ιουλίου. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε υδροπονικό σύστημα καλλιέργειας και ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε ο πετροβάμβακας (Grodan Expert®). Ο κάθε σάκος του υποστρώματος είχε 1m μήκος, 0,2m πλάτος και 0,075m ύψος. Ο πετροβάμβακας φαίνεται στις εικόνες παρακάτω.



Εικόνα 3.1 Υπόστρωμα πετροβάμβακα.

Οι σάκοι με το υπόστρωμα βρίσκονταν σε ύψος 40cm από το έδαφος και πάνω σε μεταλλικά κανάλια. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,5 φυτά/m². Η καλλιέργεια εγκαταστάθηκε σε 4 διπλές σειρές, με τα φυτά των δύο εξωτερικών γραμμών να χρησιμοποιούνται ως μάρτυρες και τις έξι εσωτερικές για μελέτη των διαφόρων μεταχειρίσεων. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται μια άποψη της καλλιέργειας τομάτας περίπου 2 μήνες μετά τη μεταφύτευση.



Εικόνα 3.2. Εσωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου.

Η άρδευση των φυτών γινόταν με τη βοήθεια σταλακτήρων με παροχή 2 L h⁻¹ και ελέγχονταν αυτόματα μέσω Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Επιπλέον, εφαρμόστηκε το

μονοστέλεχο σύστημα διαμόρφωσης της καλλιέργειας το οποίο εφαρμόζουν οι περισσότεροι παραγωγοί θερμοκηπιακής τομάτας στη χώρα μας.

3.6 ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΦΡΟΝΤΙΔΕΣ

Η υποστύλωση των φυτών έγινε με τη χρήση σπάγκου και μεταλλικών συρμάτων. Τα μεταλλικά σύρματα τοποθετήθηκαν οριζόντια ακριβώς πάνω από κάθε γραμμή – κανάλι φύτευσης. Στη συνέχεια το ένα άκρο του σπάγκου στερεώθηκε στη βάση του φυτού δένοντάς το στο κάτω μέρος του κορμού του φυτού με ειδικό τρόπο που δεν σφίγγει τον κορμό. Κατόπιν ο σπάγκος περιελίσσεται στον κορμό των φυτών και το υπόλοιπο μήκος του σπάγκου είναι τυλιγμένο σε ένα ειδικό ‘κλιπ’ τύπου ‘Α’ το οποίο κρέμεται από το οριζόντιο σύρμα με το σπάγκο να είναι σχετικά τεντωμένος. Για κάθε φυτό χρησιμοποιήθηκε και από ένα ‘κλιπ’. Όταν η κορυφή του φυτού έφτασε το οριζόντιο σύρμα, τότε ξετυλίχθηκε μέρος του σπάγκου από το ‘κλιπ’, με αποτέλεσμα το στέλεχος του φυτού να πάρει κλίση και η κορυφή να χαμηλώσει σε επίπεδο που εύκολα γίνονταν οι απαραίτητες μετρήσεις και περιποιήσεις.

Όσον αφορά το κλάδεμα, ήταν απαραίτητη εργασία γιατί τα φυτά είχαν την τάση να σχηματίζουν πολλούς πλάγιους βλαστούς από οφθαλμούς που βρίσκονταν στις μασχάλες των φύλλων. Στο μονοστέλεχο σύστημα που εφαρμόστηκε, αφαιρούνταν όλοι οι πλάγιοι βλαστοί (βλαστολόγημα) εύκολα με το χέρι γιατί ήταν τρυφεροί και εύθραυστοι. Επίσης εφαρμόστηκε και αποφύλλωση καθώς τα φυτά μεγάλωναν και όταν άρχιζε να ωριμάζει η πρώτη ταξικαρπία, δηλ. αφαιρούνταν τα φύλλα που βρίσκονταν κάτω από αυτή. Η αποφύλλωση γινόταν για να επιτραπεί ο καλύτερος φωτισμός των καρπών που βρίσκονταν πλησίον του σταδίου ωρίμανσης γιατί, όπως είναι γνωστό, το άμεσο φως βελτιώνει την ποιότητα των καρπών. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν όταν άρχιζε να ωριμάζει η αμέσως επόμενη ταξικαρπία. Τέλος, έγιναν και κάποιες επεμβάσεις φυτοπροστασίας κυρίως για την αντιμετώπιση μυκητολογικών ασθενειών (βοτρυτης) αλλά και εντομολογικών (τετράνυχος) ο οποίος προκάλεσε κάποιες απώλειες στα πειραματικά φυτά.

3.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το υδροπονικό σύστημα που εγκαταστάθηκε στο θερμοκήπιο αποτελούνταν από τις δεξαμενές άρδευσης που βρίσκονταν στη νότια πλευρά του στη συνέχεια παρεμβάλλονταν τα κανάλια με τα φυτά και στη βόρεια πλευρά βρίσκονταν οι

δεξαμενές απορροής. Το κάθε κανάλι αρδευόταν από τη δική του δεξαμενή άρδευσης και το νερό της απορροής κατέληγε στην αντίστοιχη δεξαμενή απορροής.



Εικόνα 3.3 Απεικόνιση των δεξαμενών άρδευσης (αριστερά) και των δεξαμενών απορροής (δεξιά).

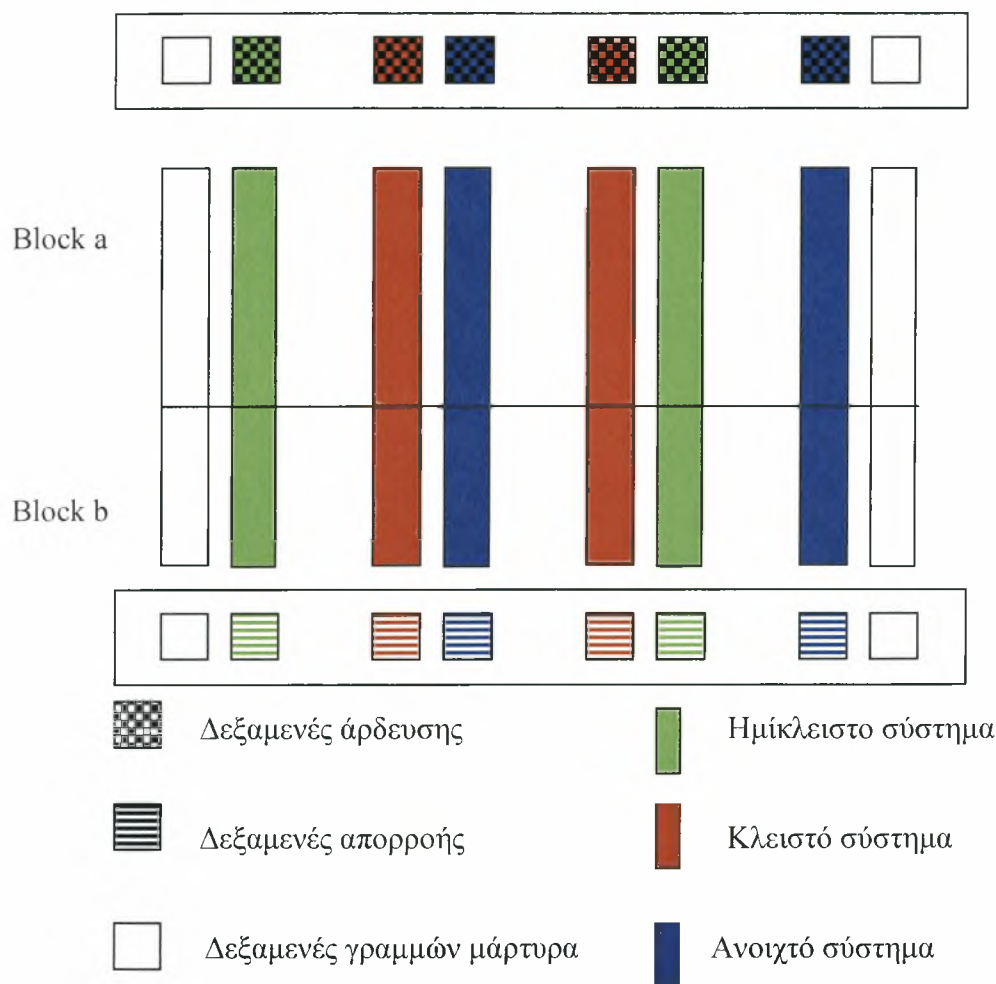
Το σύστημα που εφαρμόστηκε δεν ήταν το ίδιο για όλα τα κανάλια φυτών αλλά μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις υδροπονίας. Οι μεταχειρίσεις που μελετήθηκαν ήταν:

1. το ανοιχτό σύστημα, όπου δεν εφαρμόζεται ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος
2. το κλειστό σύστημα, με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος και συμπλήρωση μόνο νερού και θρεπτικών που απορροφήθηκαν από τα φυτά

3. και το ημίκλειστο σύστημα, με ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος μέχρι ορισμένοι παράμετροι να φτάσουν σε ένα καθορισμένο επίπεδο. Οι παράμετροι αυτοί ήταν η EC με όριο υψηλότερο από 5 dS m^{-1} στο θρεπτικό διάλυμα και η συγκέντρωση Na^+ στο διάλυμα υψηλότερη από 15 mmol l^{-1} .

Η πρώτη φορά που το θρεπτικό διάλυμα εγκαταλείφθηκε από τη δεξαμενή απορροής πραγματοποιήθηκε όταν η συγκέντρωση του Na^+ στο σύστημα ήταν μεγαλύτερη από 25 mmol l⁻¹ ενώ στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβανόταν όταν η συγκέντρωση του Na^+ ήταν 15 mmol l⁻¹. Όσο τα παραπάνω όρια δεν πετυχαίνονταν το σύστημα συμπλήρωνε νερό και θρεπτικά ανάλογα με τα ποσά που απορροφούνταν από τα φυτά.

Οι παραπάνω μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν σε κάθε γραμμή φύτευσης επιλέχθηκαν τυχαία και κάθε μεταχείριση είχε 2 επαναλήψεις. Επίσης κάθε γραμμή ανεξαρτήτως μεταχείρισης ήταν χωρισμένη σε 2 μπλόκ (blocks). Σχηματικά η απεικόνιση του πειραματικού σχεδίου φαίνεται παρακάτω.



3.8 ΤΟ ΘΡΕΠΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ

Η άρδευση της καλλιέργειας γινόταν με σωλήνες Φ20, ένας για κάθε διπλή γραμμή φύτευσης. Οι σωλήνες είχαν ενσωματωμένους σταλάκτες στις θέσεις των φυτών (1 σταλάκτης ανά φυτό). Η παρασκευή και η τροφοδότηση του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά πραγματοποιούνταν αυτόματα για τις μεν 2 εξωτερικές γραμμές (μάρτυρας) με μια κεντρική κεφαλή MACQU, για τις δε 6 εσωτερικές γραμμές με το αυτόματο σύστημα ελέγχου των θρεπτικών διαλυμάτων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου Sirtimed. Η άρδευση της καλλιέργειας γινόταν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό, όπως αυτές υπολογίζονταν από ένα προσομοίωμα υπολογισμού της διαπνοής των φυτών.



Εικόνα 3.4. Πειραματικό σύστημα παρασκευής - παροχής θρεπτικού διαλύματος.

Η σύνθεση του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος φαίνεται στον πίνακα 1 παρακάτω.

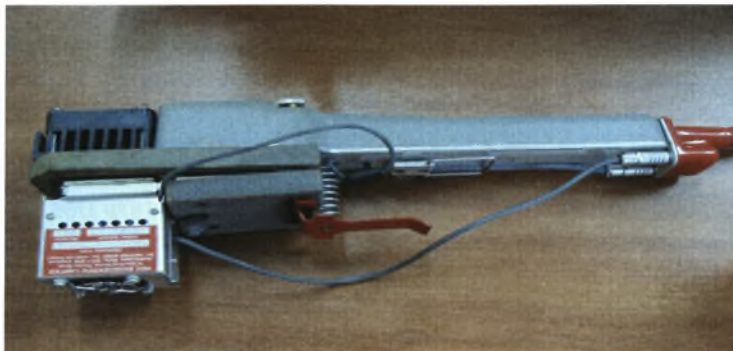
ΣΥΝΘΕΣΗ ΝΕΡΟΥ	
Ew	0,55 dS/m
Ion	Ciw
Ca ²⁺	1,40 mmol/L
Mg ²⁺	1,60 mmol/L
K ⁺	0,00 mmol/L
NH ₄ ⁺	0,00 mmol/L
Na ⁺	1,10 mmol/L
SO ₄ ²⁻	0,15 mmol/L
NO ₃ ⁻	0,10 mmol/L
H ₂ PO ₄ ⁻	0,00 mmol/L
HCO ₃ ⁻	5,70 mmol/L
Cl ⁻	1,00 mmol/L
Fe	0,00 μmol/L
Mn	1,30 μmol/L
Zn	1,20 μmol/L
Cu	0,00 μmol/L
B	0,00 μmol/L
Mo	0,00 μmol/L

Πίνακας 1. Σύνθεση του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων.

3.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.9.1 Φωτοσύνθεση

Για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης χρησιμοποιήθηκε το σύστημα κλειστού τύπου LCpro+ της ADC.



Εικόνα 3.5. Θάλαμος φύλλου του συστήματος ADC



*Εικόνα 3.6. Μέτρηση φωτοσύνθεσης σε φυτά τομάτας με τη βοήθεια του συστήματος
ADC*

3.9.1.1 Τα κύρια μέρη του συστήματος μέτρησης φωτοσύνθεσης

Τα βασικά μέρη του συστήματος μέτρησης της φωτοσύνθεσης είναι ο θάλαμος ανταλλαγής αερίων (gas exchange chamber), ο αναλυτής υπέρυθρης ακτινοβολίας (infrared gas analyzer), τα ροόμετρα, οι γραμμές αερίου, τα φίλτρα CO₂ και υδρατμών, οι μπαταρίες και ένα χειριστήριο με πληκτρολόγιο, ψηφιακή οθόνη και μνήμη.

Η κατασκευή του θαλάμου των φύλλων (leaf chamber), η αεροδυναμική και οι ιδιότητες των δομικών υλικών επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Πρέπει να εξασφαλίζεται ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης CO₂, της υγρασίας και του φωτός. Ιδιαίτερα σε συστήματα κλειστού τύπου, η στεγανότητα του θαλάμου φύλλων και η χρήση υλικών με μικρή απορροφητικότητα νερού και CO₂ είναι εξαιρετικά σημαντική.

Τα σύγχρονα συστήματα μετρούν τη συγκέντρωση CO₂, με έναν αναλυτή υπέρυθρης ακτινοβολίας μη διασποράς (non-Dispersive InfraRed Gas Analyzer, IRGA). Η συσκευή περιλαμβάνει μια πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας που περνά μέσα από ένα θάλαμο με δείγμα αερίου και μετά εστιάζεται σε έναν ανιχνευτή. Η ενέργεια που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή είναι η συνολική που μπήκε στο σύστημα μείον αυτή που απορροφήθηκε από το CO₂ του θαλάμου δειγματοληψίας. Ένα μεγάλο πρόβλημα στην αποδοτικότητα και αξιοπιστία του IRGA είναι η διάκριση μεταξύ CO₂ και υδρατμών, καθώς και τα δύο αέρια απορροφούν ενέργεια σε παρόμοια μήκη κύματος. Για τη επίλυση αυτού του προβλήματος, το δείγμα του αερίου ξηραίνεται, πριν φθάσει τον IRGA σε κάποια σταθερή περιεκτικότητα σε νερό.

Η ενσωμάτωση προηγμένων υπολογιστικών προγραμμάτων επιτρέπει την άμεση πρόσβαση σε δεδομένα στον αγρό και τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων κατά τη μέτρηση.

3.9.1.2 Περιγραφή του συστήματος LCpro+

Πρόκειται για ένα εύχρηστο, φορητό σύστημα μέτρησης της φωτοσύνθεσης, διαπνοής και στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων, εξαιρετικά μικρών διαστάσεων και βάρους του οίκου ADC Αγγλίας με πλήρες σύστημα ρύθμισης και ελέγχου του μικροκλίματος (ADC Instruction Manual, 2004).



Εικόνα 3.7. Συσκευή μέτρησης φωτοσύνθεσης LCpro+

3.9.1.3 Υπολογισμοί παραμέτρων φωτοσύνθεσης

Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), ο ρυθμός διαπνοής (E), η στοματική αγωγιμότητα (gs) και η συγκέντρωση CO₂ στην υποστομάτια κοιλότητα (C_i) υπολογίζεται στο σύστημα LCpro+ ως εξής:

- **Ρυθμός φωτοσύνθεσης (A)**

$$A = U_s * \Delta C \quad (\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

Όπου ΔC η διαφορά στη συγκέντρωση CO₂ μέσα στο θάλαμο του φύλλου, διορθωμένη ως προς την αραίωση.

U_s είναι η ροή μάζας αέρα ανά m² φυλλικής επιφάνειας, mol m⁻² s⁻¹

Δηλαδή:

$$U_s = U / \text{φυλλική επιφάνεια}$$

Όπου:

U η μοριακή ροή αέρα σε mol s⁻¹ και η προβολή της φυλλικής επιφάνειας του φύλλου σε m².

- **Ρυθμός διαπνοής (E)**

$$E = U_s * \Delta W \quad (\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

Όπου

ΔW η διαφορική συγκέντρωση πίεσης υδρατμών, διορθωμένη ως προς την αραίωση.

U_s η ροή μάζας αέρα ανά m^2 φυλλικής επιφάνειας.

- **Στοματική αντίσταση – αγωγιμότητα στην πίεση υδρατμών (rs/gs)**

Στοματική αντίσταση

$$r_s = \left\{ \frac{(w_{leaf} - w_{air})}{(U_s \times \Delta w)} \right\} = r_b \quad (m^2 \text{ s mol}^{-1})$$

Όπου W_{leaf} η συγκέντρωση πίεσης υδρατμών στον κορεσμό στην επιφάνεια του φύλλου.

$$W_{leaf} = e_s/p$$

Όπου e_s η κορεσμένη πίεση υδρατμών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου (mbar)

p η ατμοσφαιρική πίεση (mbar)

ΔW η διαφορική πίεση υδρατμών μέσα στο θάλαμο του φύλλου (mol mol^{-1})

W_{air} η συγκέντρωση πίεσης υδρατμών έξω από το θάλαμο του φύλλου (mol mol^{-1})

r_b η αντίσταση της οριακής στιβάδας στην πίεση υδρατμών ($m^2 \text{ s mol}^{-1}$)

U_s η ροή μάζας αέρα ανά m^2 φυλλικής επιφάνειας ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Στοματική αγωγιμότητα

$$g_s = 1/r_s \quad (\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

- **Συγκέντρωση CO_2 στην υπο-στομάτια κοιλότητα (C_i)**

$$C_i = \frac{((g_s - \frac{E}{2})C_{air}) - A}{g_s + \frac{A}{2}} \quad (\mu\text{mol mol}^{-1})$$

Όπου

$$g_c = 1/(1.6r_s + 1.37r_b)$$

c_{an} η ροή CO₂ έξω από θάλαμο του φύλλου (μmol mol⁻¹) διορθωμένη ως προς την αραίωση

E ο ρυθμός διαπνοής (mol m⁻² s⁻¹)

A ο ρυθμός φωτοσύνθεσης ανταλλαγής CO₂ στο θάλαμο του φύλλου (μmol mol⁻¹)

r_b το οριακό στρώμα αντίστασης στην πίεση υδρατμών (m² s⁻¹ mol⁻¹)

r_s η στοματική αντίσταση στην πίεση υδρατμών (m² s⁻¹ mol⁻¹).

3.9.1.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Διαθέτει περιοχή μέτρησης της συγκέντρωσης του CO₂ από 0-2000ppm. Η δυνατότητά του αυτή καθιστά το όργανο ικανό για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Περιοχή μέτρησης του H₂O από 0 έως 75 mBar.

Περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας των φύλλων από 0 έως +50 °C.

Περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα από 0 έως +50 °C.

Διαθέτει αισθητήρα PAR ακτινοβολίας ενσωματωμένο στον θάλαμο του φυτού.

Διαθέτει μηχανισμό RAM CARD στον οποίο καταχωρούνται οι μετρήσεις.

Περιοχή μέτρησης και ρύθμιση της ροής του αέρα εντός του θαλάμου από 100 έως 500 ml/min.

Ανάλυση μέτρησης του CO₂ : 1ppm.

Ανάλυση μέτρησης του H₂O : 0.1mBar.

Ανάλυση μέτρησης θερμοκρασίας φύλλου : 0.1 °C.

Περιοχή μέτρησης της PAR 0-3000 μmol m⁻² sec⁻¹.

Το σύστημα εκτελεί αυτόματα διορθώσεις ώστε οι μετρήσεις των H₂O και CO₂ να είναι πλήρως σταθερές. Επίσης η μονάδα διαθέτει αυτόματη αντιστάθμιση των παραμέτρων που απαιτούνται από τη τεχνική IRGA (Infra Red Gas Analyzer). Η μέτρηση των παραμέτρων H₂O και CO₂ πραγματοποιείται στο ίδιο δείγμα αέρα. Επιπλέον, η μονάδα διαθέτει πόρτα RS-232 για μεταφορά των μετρήσεων σε υπολογιστή. Έχει βάρος 4.4kg.

3.9.1.5 Διαξαγωγή μετρήσεων

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έλαβαν χώρα από τον Ιανουάριο του 2011 έως τον Ιούνιο του ίδιου έτους. Για τις μετρήσεις επελέγησαν για κάθε μεταχείριση (ανοιχτό, ημίκλειστο και κλειστό σύστημα καλλιέργειας) τυχαία 6 φυτά/μεταχείριση με ακόμη μία επανάληψη, δηλαδή 36 φυτά συνολικά για κάθε μέτρηση φωτοσύνθεσης. Οι μετρήσεις διεξάγονταν περίπου κάθε 15νθήμερο σε ένα τυχαίο υγιές καλά ανεπτυγμένο φύλλο που βρισκόταν στο μέσο περίπου του συνολικού ύψους του φυτού κάθε φορά. Για την αποφυγή προβλημάτων από νεφοσκεπής ημέρες οι μετρήσεις διεξάγονταν με σταθερή ακτινοβολία της συσκευής LCpro+ έντασης $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν συνολικά 11 πλήρη σετ μετρήσεων από Ιανουάριο έως και Ιούνιο.

3.9.2 Ύψους Φυτών

Οι μετρήσεις ύψους των φυτών ξεκίνησαν τον Ιανουάριο του 2011 και ολοκληρώθηκαν τον Ιούνιο του ίδιου έτους. Σε κάθε μέτρηση ύψους επιλέγονταν 6 φυτά από κάθε μεταχείριση τα οποία αρχικά ήταν σταθερά δείγματα μαρκαρισμένα με κόκκινη κορδέλα. Κατά τη πορεία του πειράματος μερικά από τα μαρκαρισμένα φυτά παρουσίασαν προβλήματα από ασθένειες και στη περίπτωση αυτή επιλέγονταν κάθε φορά άλλα τυχαία αντιπροσωπευτικά φυτά. Συνολικά μετρήσεις ύψους λαμβάνονταν από 36 φυτά κάθε φορά και πραγματοποιούνταν με συχνότητα 15νθήμερου. Η μέτρηση του ύψους γινόταν με χαρτοταινία του 1 μέτρου για αποφυγή τραυμάτων στα φυτά από μεταλλική μεζούρα. Η τοποθέτηση του σημείου μηδέν της ταινίας γινόταν στο λαιμό του φυτού (στο σημείο επαφής με τον πετροβάμβακα) και τεντωνόταν κατά μήκος του φυτού μέχρι το ανώτερο φύλλο όπου και καταγράφαμε το ύψος του. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 10 σετ μετρήσεων.

3.9.3 Φυλλικής επιφάνειας

Για τη διεξαγωγή της μέτρησης της φυλλικής επιφάνειας επιλέγονταν κάθε φορά 6 φυτά από κάθε μεταχείριση και γινόταν καταγραφή του αριθμού των φύλλων τους. Επιπλέον, λαμβάνονταν το μήκος ενός φύλλου ανά ταξιανθία με τη βοήθεια

χαρτοταινίας. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνταν για 36 φυτά κάθε φορά και συνολικά πραγματοποιήθηκαν 4 σετ μετρήσεων. Με τη βοήθεια του MSExcel υπολογίστηκε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (leaf area index, LAI).

3.9.4 Καταστροφικές

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν 3 σετ καταστροφικών μετρήσεων οι οποίες έλαβαν χώρα στο εργαστήριο. Σε κάθε καταστροφική λαμβάνονταν 2 φυτά από κάθε μεταχείριση συμπεριλαμβανομένων και των επαναλήψεων δηλαδή συνολικά λαμβάνονταν 12 φυτά. Στη συνέχεια διεξάγονταν μεμονωμένες μετρήσεις οι οποίες σχετίζονταν με τα εξής: μορφολογικά χαρακτηριστικά (μήκος βλαστού, ύψος και αριθμός φύλλων), χλωρά βάρη (βλαστού, φύλλων και καρπών), ξηρά βάρη (βλαστών, φύλλων και καρπών), αριθμός καρπών, αριθμός ταξιανθιών και αριθμός ταξικαρπιών, παραγωγικότητα (συνολικό χλωρό βάρος ανά στρ., συνολικό ξηρό βάρος ανά στρ., χλωρό βάρος καρπών ανά στρ. και μέσο χλωρό βάρος καρπού) καθώς και μετρήσεις φυλλικής επιφάνειας. Για τη διευκόλυνση διεξαγωγής των παραπάνω μετρήσεων τα φυτά τεμαχίζονταν στα διάφορα μέρη τους απομονώνοντας τα φύλλα, τους βλαστούς, τις ταξιανθίες, τις ταξικαρπίες και τους καρπούς. Για τη καταγραφή των ξηρών βαρών χρησιμοποιήθηκε κλίβανος ξήρανσης ο οποίος ήταν ρυθμισμένος στους 85 °C περίπου. Μετά τη περίοδο ξήρανσης τα διάφορα μέρη του φυτού ζυγίζονταν σε ζυγαριά ακριβείας και καταγράφαμε τις τιμές.

3.9.5 Παραγωγής

Στο πλαίσιο του πειράματος μελετήθηκε και η παραγωγή των φυτών τομάτας στις διάφορες μεταχειρίσεις (ανοιχτό, ημίκλειστο και κλειστό υδροπονικό σύστημα). Η παραγωγή των φυτών ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2011 και ολοκληρώθηκε στο τέλος Ιουνίου. Η συγκομιδή της τομάτας γινόταν για κάθε κανάλι – μεταχείριση ξεχωριστά και για λόγους καλύτερης διαχείρισης της παραγωγής και διεξαγωγής των απαραίτητων μετρήσεων, τα κανάλια χωρίστηκαν σε 3 επιμέρους μπλοκ (Α-Γ), με τους συγκομισμένους καρπούς να τοποθετούνται σε ξεχωριστά κυτία. Η συγκομιδή γινόταν όταν το χρώμα των καρπών ήταν πορτοκαλί ή κόκκινο με την πλειοψηφία να συγκομίζεται όταν οι καρποί βρίσκονταν σε πλήρη στάδιο ωριμότητας. Η συχνότητα της συγκομιδής ήταν 3 – 4 φορές την εβδομάδα για να επιτευχθεί ομοιομορφία στην ωρίμανση των καρπών και ταυτόχρονα μείωση των απωλειών λόγω υπερωρίμανσης.

Μετά τη συγκομιδή οι καρποί καταμετρούνταν για κάθε μεταχείριση και κανάλι και στη συνέχεια ζυγίζονταν έτσι ώστε να καταγράψουμε τα χλωρά βάρη (κιλά παραγωγής) για κάθε μεταχείριση. Πρέπει να σημειώσουμε ότι στη διάρκεια της παραγωγικής ζωής των φυτών η πλειοψηφία των συγκομισμένων καρπών παρουσίασε μια ανωμαλία η οποία αναφέρεται ως ξηρή σήψη κορυφής καρπού. Η ανωμαλία αυτή οφείλεται στην δυσκολία απορρόφησης και διακίνησης του ασβεστίου από το φυτό. Επίσης υψηλά επίπεδα αλατότητας στο υπόστρωμα είναι συχνή αιτία που προκαλείται το φαινόμενο της σήψης της κορυφής.

3.9.6 Κατανάλωση νερού και όγκος νερού απορροής

Η κατανάλωση νερού για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος ήταν για το ανοιχτό σύστημα 415 L/m², για το κλειστό σύστημα 268 L/m² και για το ημίκλειστο 310 L/m².

Για το ανοιχτό σύστημα όσο νερό απέρρεε από τους σάκους του πετροβάμβακα δηλαδή τα 133 L/m² η ίδια ποσότητα νερού απορρίφθηκε από το σύστημα γι' αυτό και στο ανοιχτό έχουμε τη μεγαλύτερη κατανάλωση νερού. Στο κλειστό σύστημα η ποσότητα του νερού απορροής ήταν 164 L/m² αλλά δεν απορρίφθηκε καθόλου νερό διότι ανακυκλωνόταν συνεχώς. Τέλος στο ημίκλειστο σύστημα το νερό απορροής ήταν 136 L/m² και η ποσότητα που απορρίφθηκε ήταν 29 L.

3.9.7 Υπολογισμός συγκέντρωσης Na⁺

Το μοντέλο μάζας ισοζυγίου που χρησιμοποιήθηκε, συσχετίζει τη συγκέντρωση Na⁺ στο ανακυκλώμενο θρεπτικό διάλυμα με τη ποσότητα νερού που προσλαμβάνεται από τα φυτά. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό μιας εμπειρικής σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης ιόντων Na⁺ στο περιβάλλον της ζώνης της ρίζας (CN_{as}) με τον αντίστοιχο λόγο ιόντων Na⁺ στη πρόσληψη νερού (CN_{au}) από συγκεκριμένα είδη φυτών. Σύμφωνα με τους Sonneveld et al. (1999) και Savvas et al. (2005b), η σχέση μεταξύ CN_{as} και CN_{au} μπορεί να περιγράφεται από μια γραμμική συνάρτηση, αλλά για τα περισσότερα είδη φυτών που καλλιεργούνται σε θερμοκήπια η γραμμική σχέση είναι :

$$C_{Nau} = aC_{Nas}^b \quad (1)$$

όπου a και b είναι σταθερές τιμές που εξαρτώνται από τα καλλιεργούμενα είδη.

Όταν η συνολική ποσότητα του νερού απορροής συλλέγεται και ανακυκλώνεται σε μια υδροπονική καλλιέργεια, η μόνη εισροή Na^+ και νερού στο κλειστό σύστημα προέρχεται από το αρδευτικό δίκτυο και μόνο, και η μόνη εκροή Na^+ από το σύστημα οφείλεται στην πρόσληψή του από το φυτό. Επομένως, ο λόγος εισροής Na^+ ανά ποσότητα νερού ισούται με τη συγκέντρωση Na^+ στο νερό άρδευσης που χρησιμοποιείται για το θρεπτικό διάλυμα (C_{Naw}), καθώς ο λόγος εισροής Na^+ ανά ποσότητα νερού είναι ίσος με C_{Nau} και αναφέρεται συνήθως ως συγκέντρωση πρόσληψης (Sonneveld, 2002). Υπό αυτές τις συνθήκες, οποιαδήποτε αύξηση του C_{Nas} είναι ανάλογη με την αύξηση της συνολικής ποσότητας του εισερχόμενου νερού στην καλλιέργεια (V_w) και της διαφοράς μεταξύ του ρυθμού του εισρέοντος Na^+ και του εκρέοντος Na^+ ($C_{\text{Naw}} - C_{\text{Nau}}$) και αντιστρόφως ανάλογη του συνολικού όγκου του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στο κλειστό σύστημα (V_s). Η σχέση αυτή γράφεται μαθηματικά στη μορφή μάζας ισοζυγίου ως εξής:

$$dC_{\text{Nas}} = dV_w (C_{\text{Naw}} - C_{\text{Nau}}) / V_s \quad (2)$$

από την οποία προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$dC_{\text{Nas}} / dV_w = (C_{\text{Naw}} - C_{\text{Nau}}) / V_s \quad (3)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (1) στην (3) προκύπτει:

$$dC_{\text{Nas}} / dV_w = (C_{\text{Naw}} - aC_{\text{Nas}}^b) / V_s \quad (4)$$

Στην εξίσωση (4) η μεταβλητή C_{Nas} δείχνει τη συσσώρευση του Na^+ στο κλειστό σύστημα, η V_w είναι μια αυξανόμενη μεταβλητή που είναι δυνατόν να παρακολουθείται αυτόματα με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, C_{Naw} είναι γνωστή σταθερά μέσω χημικής ανάλυσης και V_s είναι η τιμή που παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Επιπλέον, οι σταθερές a και b έχουν καθοριστεί πειραματικά για την τομάτα (Varlagas et al., 2010). Επομένως, η εξίσωση (4) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της C_{Nas} ως σχέση της συνεχώς παρακολουθούμενης μεταβλητής V_w . Στη γενική περίπτωση, δεν υπάρχει αναλυτική λύση που να ικανοποιεί

τη διαφορική εξίσωση (4) και ως εκ τούτου, ο Savvas et al. (2005a), εφήρμοσε μια αριθμητική μέθοδο σύμφωνα με τον Butcher (1987).

3.10 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

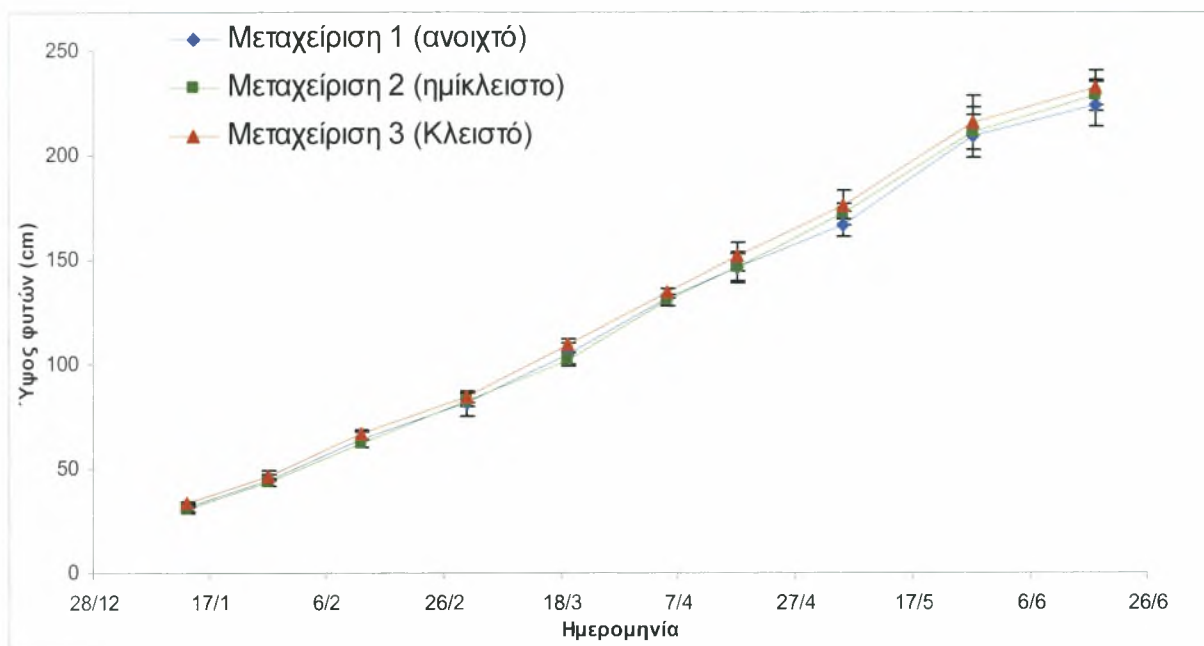
Οι μετρήσεις ύψους, φυλλικής επιφάνειας, οι καταστροφικές και οι μετρήσεις παραγωγής συλλέγονταν και αποθηκεύονταν σε αρχεία MSexcel μέχρι την ολοκλήρωση των σετ της εκάστοτε μέτρησης. Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης πραγματοποιούνταν με το σύστημα LCpro+ το οποίο διαθέτε δικό του σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης (διαθέτει μηχανισμό RAM CARD στον οποίο καταχωρούνται οι μετρήσεις).

Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη χρήση του MSexcel και του στατιστικού πακέτου SPSS. Για την επεξεργασία των μετρήσεων στο στατιστικό πακέτο SPSS χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία της two-way Analysis of Variance (two-way ANOVA) για τις τρεις μεταχειρίσεις έτσι ώστε να παρατηρήσουμε την επίδραση της αλατότητας στην ανάπτυξη και τη παραγωγή των φυτών τομάτας, για πιθανότητα $P=0,05$.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

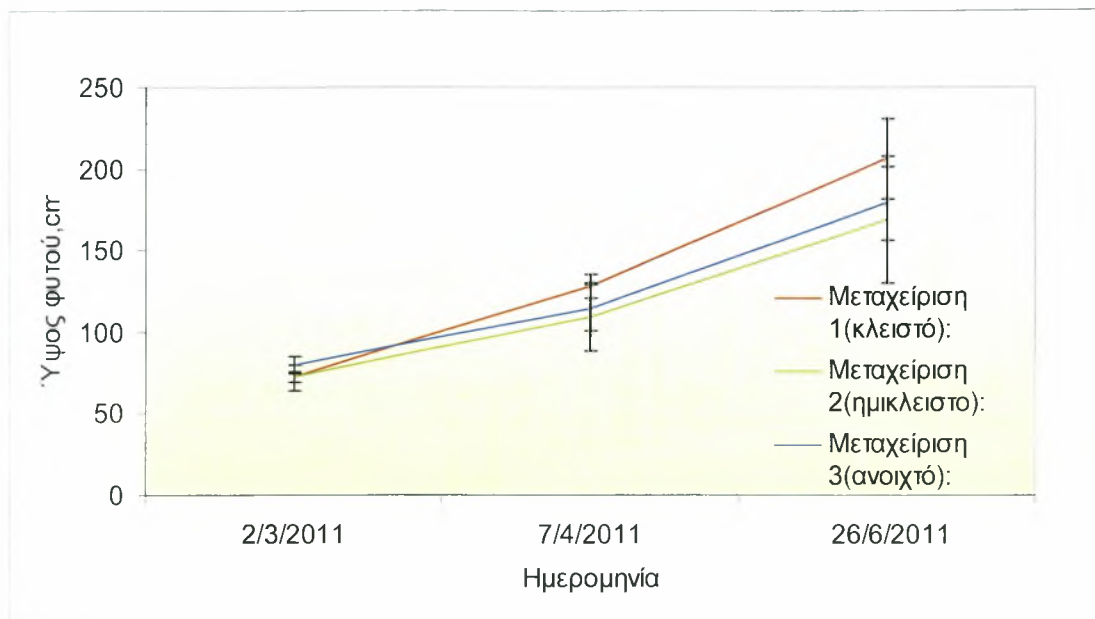
4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΥΨΟΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 φαίνεται η αύξηση των φυτών τομάτας (ύψος) συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος (ανοιχτό, ημίκλειστο και κλειστό).



Σχήμα 4.1. Πορεία του ύψους των φυτών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για τις τρεις μεταχειρίσεις. Οι κατακόρυφες μπάρες υποδηλώνουν την τυπική απόκλιση των τιμών.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το ύψος των φυτών τομάτας συγκεκριμένες χρονικές περιόδους όπου έλαβαν χώρα τρεις καταστροφικές μετρήσεις. Η πρώτη πραγματοποιήθηκε στις 2/3/2011, η δεύτερη στις 7/4/2011 και η τρίτη στις 26/6/2011.

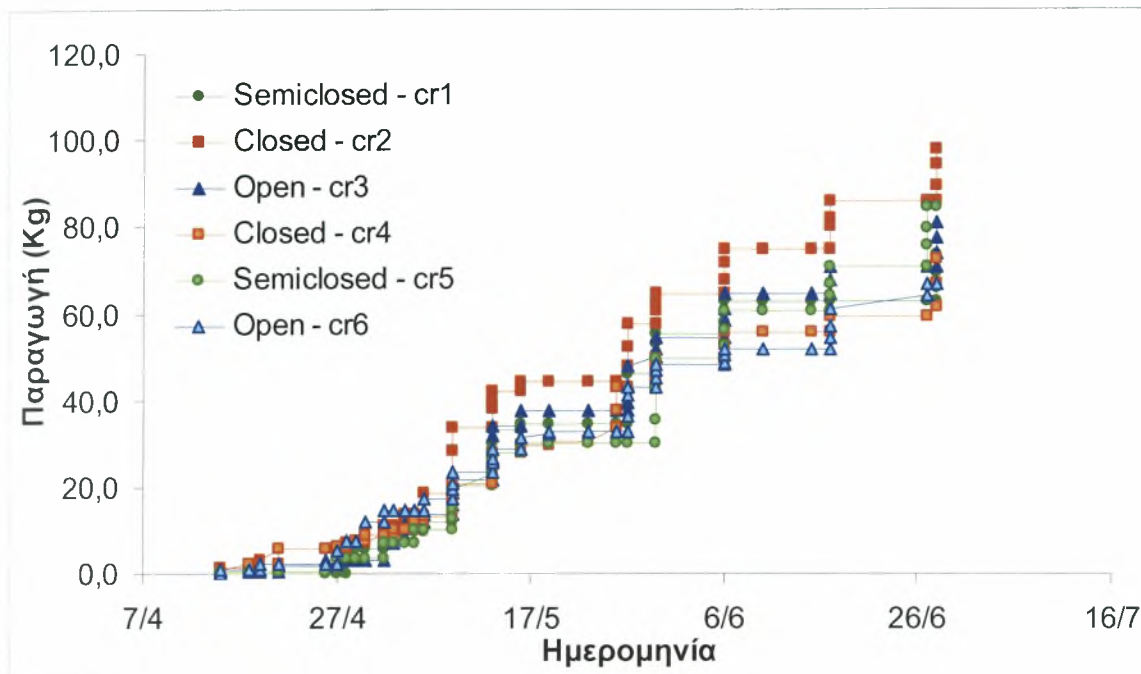


Σχήμα 4.2. Διαγραμματική απεικόνιση του ύψους των φυτών των τριών μεταχειρίσεων στις τρεις καταστροφικές μετρήσεις.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.1 και 4.2 η πορεία του ύψους των φυτών ήταν παρόμοια και για τις τρεις μεταχειρίσεις καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Η μέση τιμή του ύψους των φυτών στο τέλος της πειραματικής περιόδου ήταν 224,41 cm, 228,75 cm και 232,66 cm για το ανοιχτό, ημικλειστό και κλειστό υδροπονικό σύστημα αντίστοιχα. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων έδειξε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών του ύψους που παρατηρήθηκαν.

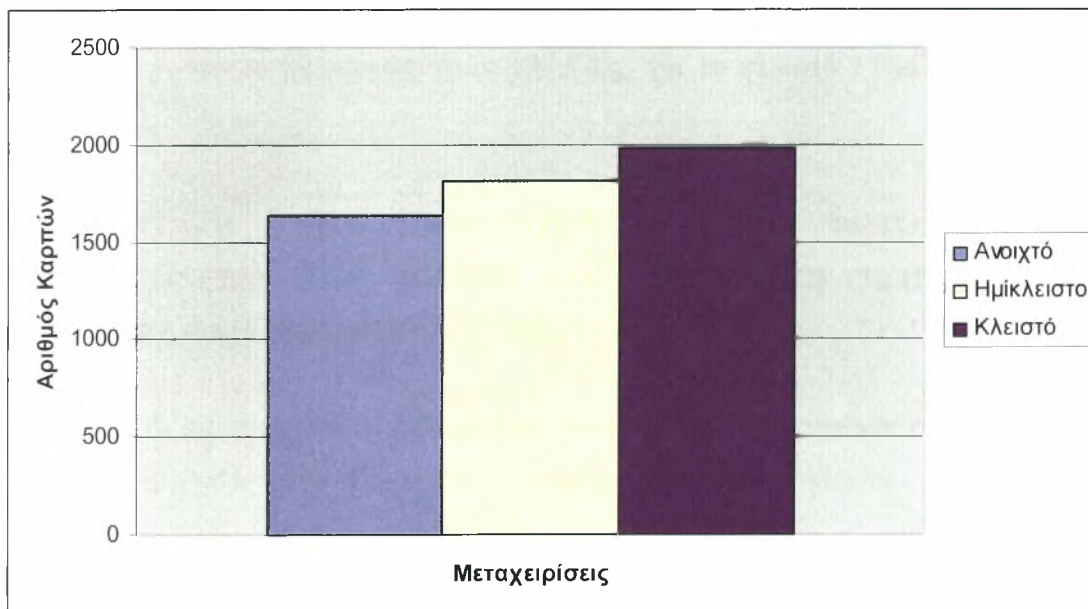
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το βάρος των καρπών τομάτας για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος κατά τη διάρκεια της περιόδου συγκομιδής.



Σχήμα 4.3. Παραγωγή τομάτας (kg) ανά κανάλι (13 m²) και μεταχείριση.

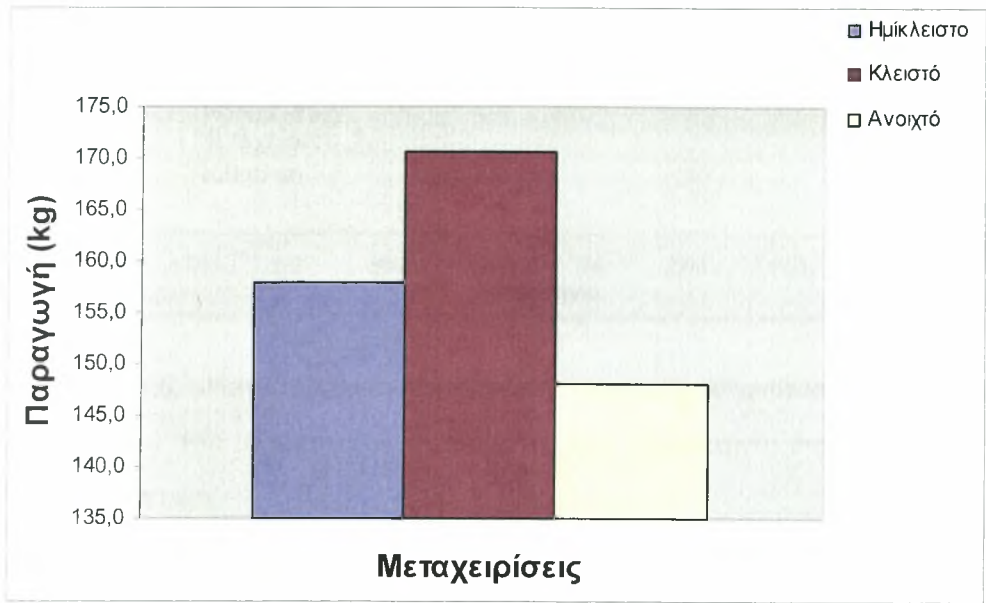
Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται με ιστόγραμμα ο αριθμός των καρπών τομάτας ανά μεταχείριση.



Σχήμα 4.4. Αριθμός καρπών τομάτας ανά μεταχείριση (26 m²) καλλιέργειας.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο αριθμός των καρπών συνολικά για κάθε μεταχείριση συμπεριλαμβανομένων και των επαναλήψεων αυτών. Ο αριθμός των

καρπών για το ανοιχτό υδροπονικό σύστημα ήταν 1639, για το ημίκλειστο 1811 και για το κλειστό 1978 όπου και παρουσιάζεται ο μέγιστο αριθμός καρπών. Στο σχήμα 4.5 φαίνεται συνολικά η παραγωγή τομάτας και για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.

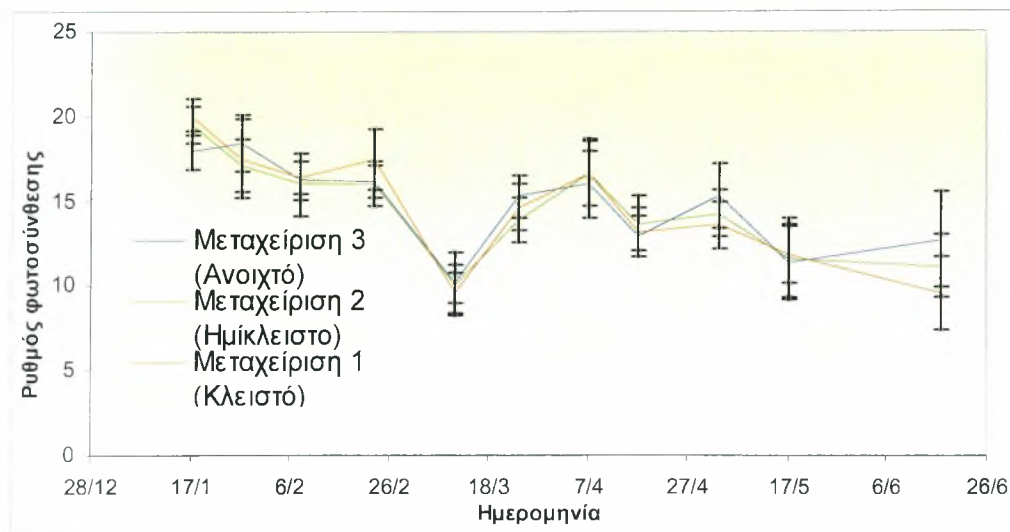


Σχήμα 4.5. Συνολική παραγωγή τομάτας (26 m²) ανά μεταχείριση.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω ιστόγραμμα η παραγωγή τομάτας για το ημίκλειστο σύστημα υδροπονίας ήταν 157,8 kg, για το κλειστό 170,6 kg και για το ανοιχτό 148,1 kg.

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών της τομάτας για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος που μελετήθηκαν.

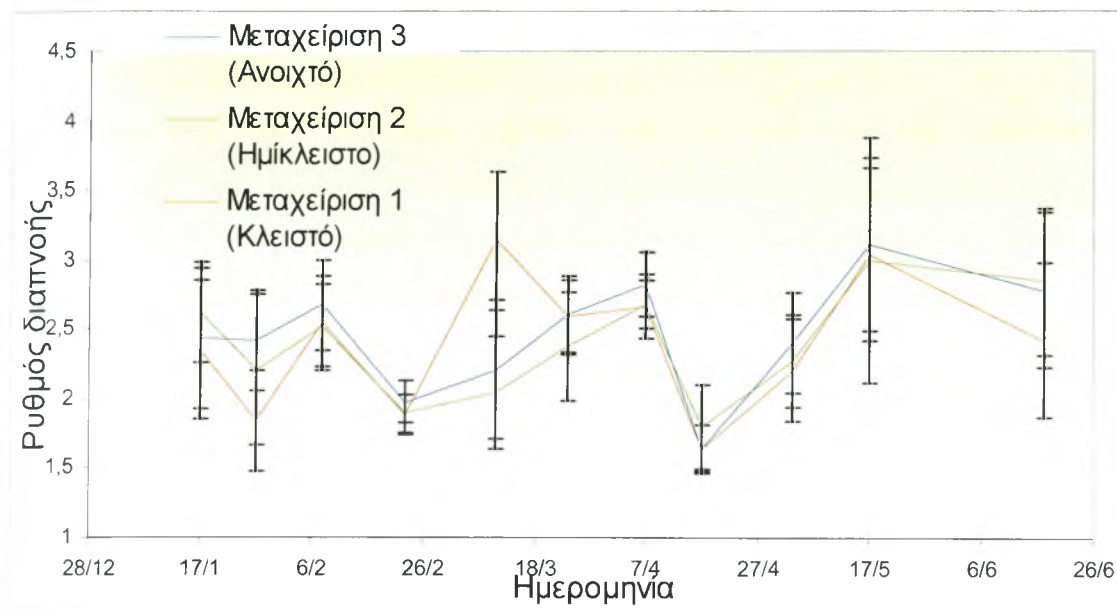


Σχήμα 4.6. Διαγραμματική απεικόνιση του ρυθμού φωτοσύνθεσης για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος ανά ημερομηνία διεξαγωγής μέτρησης της φωτοσύνθεσης.

Η επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση των φύλλων δεν είναι σημαντική καθώς και οι Mavrogiannopoulos et al., (1999) διαπίστωσαν μια πολύ αδύναμη συσχέτιση μεταξύ φωτοσύνθεσης και αλατότητας σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού. Επιπλέον, οι Schwartz et al., (2002) διαπίστωσαν σε καλλιέργεια τομάτας που αναπτύχθηκε σε κλειστό υδροπονικό σύστημα πως σε συνθήκες αλατότητας από 1.25 έως 8.75 dS m⁻¹ η αυξημένη αλατότητα δεν επηρέασε το ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου, μείωσε όμως τη φωτοσύνθεση του φυτού κατά 1.7 – 4.5% ανά dS m⁻¹ αύξησης της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος λόγω μείωσης της φυλλικής επιφάνειας σε υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα η φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών ήταν παρόμοια και για τις τρεις μεταχειρίσεις με εξαίρεση μόνο στο τέλος της περιόδου όπου η φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών στο κλειστό υδροπονικό σύστημα έπεσε σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με το ανοικτό και ημίκλειστο σύστημα. Η μέση τιμή της φωτοσύνθεσης στο τέλος της πειραματικής περιόδου ήταν 12.707 μmol m⁻² s⁻¹, 11,164 μmol m⁻² s⁻¹ και 9,571 μmol m⁻² s⁻¹ για το ανοικτό, ημίκλειστο και κλειστό σύστημα αντίστοιχα. Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων έδειξε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών της φωτοσύνθεσης που παρατηρήθηκαν.

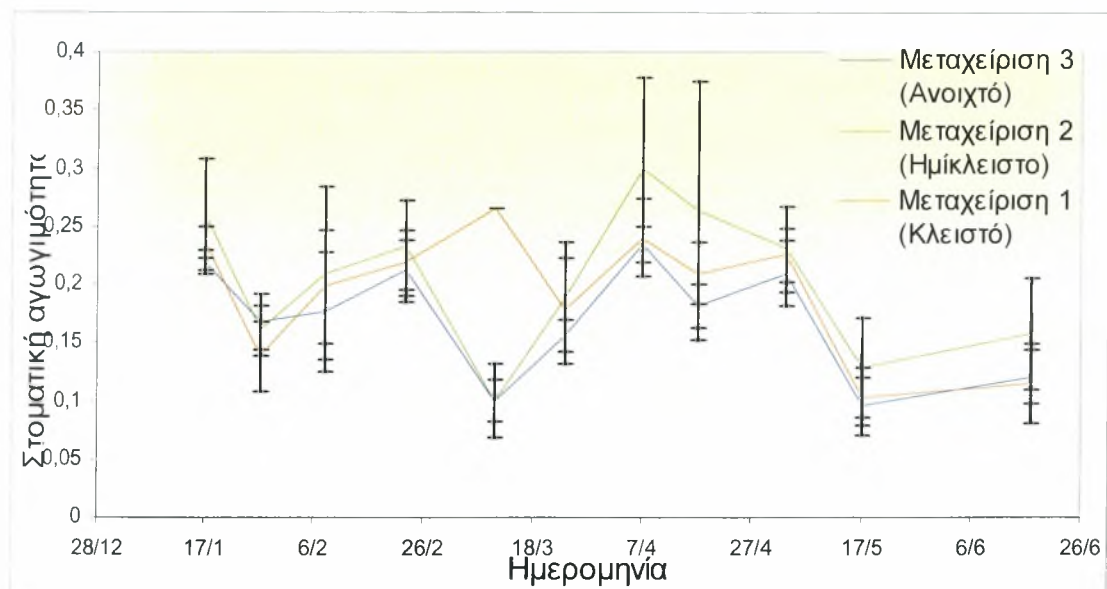
Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ο ρυθμός διαπνοής των φυτών για τις τρεις μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.7. Ρυθμός διαπνοής των φυτών για τις τρεις μεταχειρίσεις ανά ημερομηνία εκτέλεσης των μετρήσεων.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ο ρυθμός διαπνοής δεν διαφέρει σημαντικά για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος. Ο μέσος όρος του ρυθμού διαπνοής για το ανοικτό σύστημα είναι 2,46 για το ημίκλειστο 2,38 και για το κλειστό 2,39 mmol m⁻² s⁻¹.

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η στοματική αγωγιμότητα των φυτών των τριών μεταχειρίσεων.



Σχήμα 4.8. Διαγραμματική απεικόνιση της στοματικής αγωγιμότητας των φυτών ανά ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως οι μέσοι όροι της στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων της υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας είναι σχεδόν παρόμοιοι, εκτός από τη μέτρηση της στοματικής αγωγιμότητας που πραγματοποιήθηκε στις 11/3/2011 η οποία οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα, για τις τρεις μεταχειρίσεις.

Οι Mavrogiannopoulos et al., (1999) διαπίστωσαν μια μικρή επίδραση της αλατότητας στη στοματική αγωγιμότητα υδροπονικής καλλιέργειας πεπονιού επιβεβαιώνοντας ουσιαστικά τα αποτελέσματά μας.

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (leaf area index) όπως υπολογίστηκε και για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.

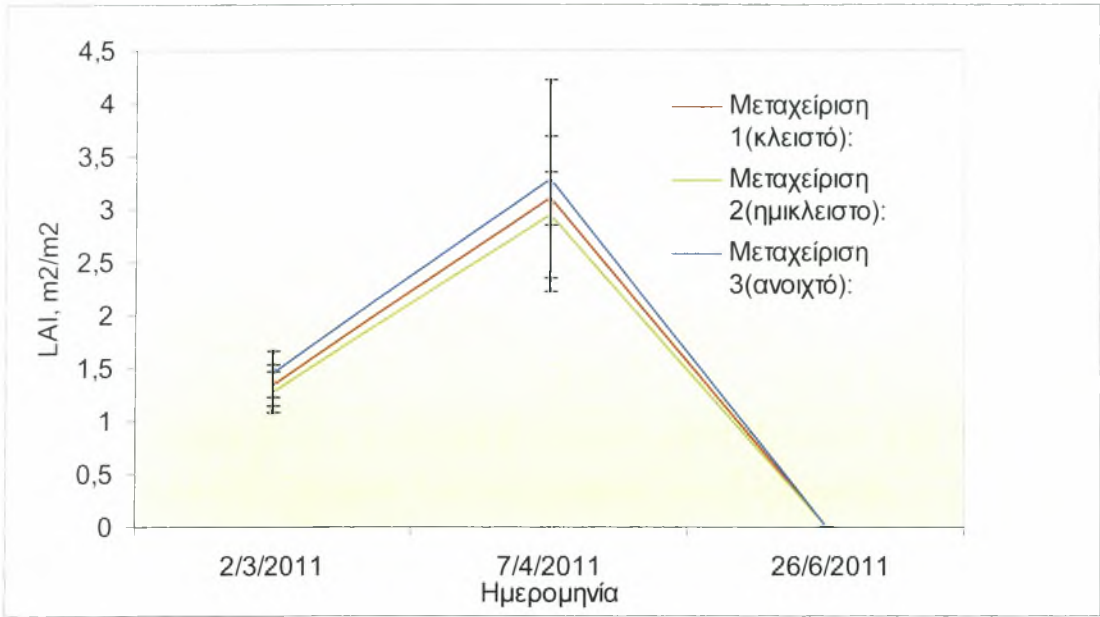


Σχήμα 4.9. Απεικόνιση της φυλλικής επιφάνειας των φυτών ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους.

Όπως φαίνεται από το σχήμα η φυλλική επιφάνεια των φυτών και για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος είναι παρόμοια με μια μικρή αύξηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) για τα φυτά του κλειστού συστήματος σε σχέση με

το ημίκλειστο και το ανοιχτό. Για το ανοιχτό σύστημα ο μέσος όρος φυλλικής επιφάνειας είναι 1,4 για το ημίκλειστο 1,34 και για το κλειστό 1,5.

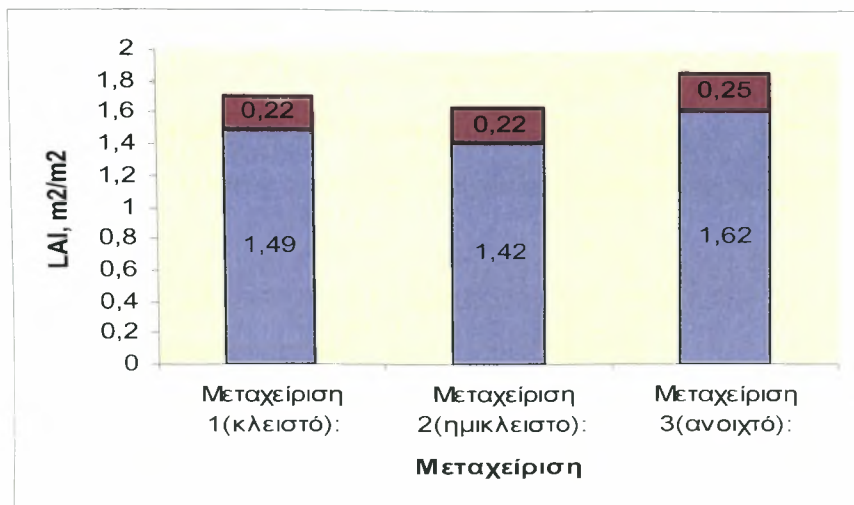
Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας των φυτών κατά τη περίοδο των τριών καταστροφικών μετρήσεων για τις τρεις μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.10. Απεικόνιση του LAI (leaf area index) τις περιόδους που πραγματοποιήθηκαν οι καταστροφικές μετρήσεις.

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται ότι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερος για το ανοιχτό σύστημα κατά τη πρώτη και δεύτερη καταστροφική μέτρηση με τιμές 1,44 και 3,28 αντίστοιχα. Το κλειστό και ημίκλειστο σύστημα παρουσιάζουν μικρότερο δείκτη φυλλικής επιφάνειας αφού τα φυτά παρουσίαζαν καχεκτική ανάπτυξη λόγω συγκέντρωσης αλάτων στη ζώνη της ρίζας.

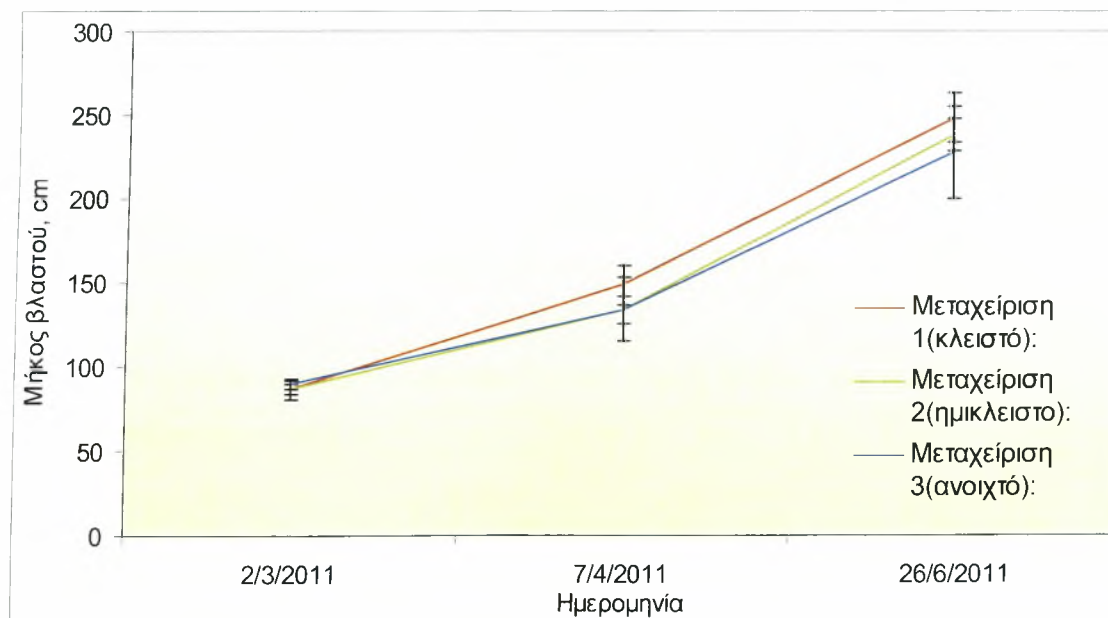
Στο σχήμα 4.11 φαίνεται ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας LAI και η τυπική απόκλιση για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.



Σχήμα 4.11. Οι μπλε μπάρες συμβολίζουν το μέσο όρο του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και για τις τρεις μεταχειρίσεις και οι βυσσινί την τυπική απόκλιση.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΜΕΤΑΧΕΙΡΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

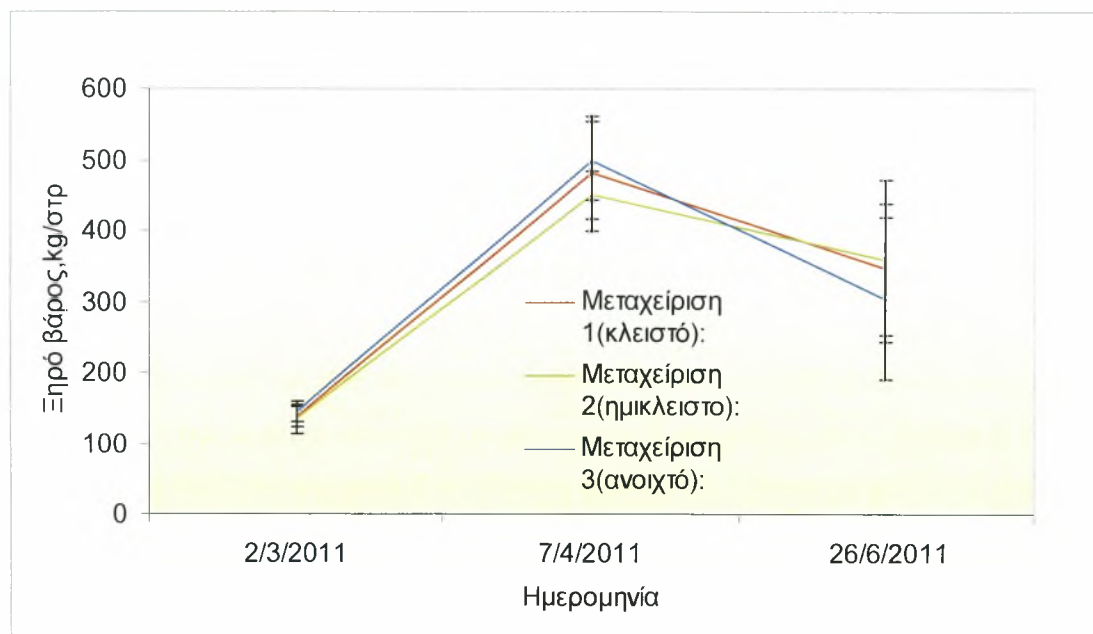
Στο σχήμα 4.12 φαίνεται το μήκος του βλαστού των φυτών για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.



Σχήμα 4.12. Μήκος βλαστού των φυτών και για τα τρία συστήματα καλλιέργειας.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχεδιάγραμμα τα μήκη των βλαστών των φυτών που επιλέχθηκαν είναι παρόμοια με μια μικρή αύξηση του μήκους για τα φυτά του κλειστού υδροπονικού συστήματος. Κατά τη δεύτερη και τρίτη καταστροφική μέτρηση τα φυτά του κλειστού συστήματος είχαν αυξημένο μήκος βλαστού κατά 10 με 15 cm.

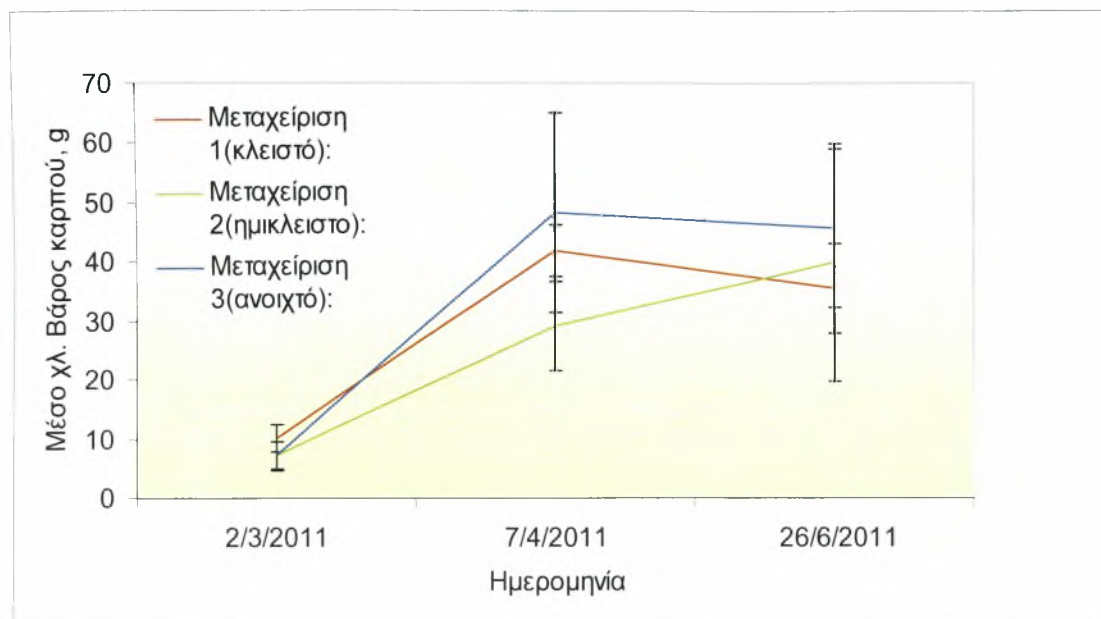
Στο σχήμα 4.13 φαίνεται το ξηρό βάρος των φυτών από τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.



Σχήμα 4.13. Ξηρό βάρος φυτών για τις τρεις μεταχειρίσεις του συστήματος.

Όπως φαίνεται παραπάνω το ξηρό βάρος των φυτών και από τις τρεις μεταχειρίσεις είναι σχεδόν το ίδιο ενώ στο τέλος της περιόδου παρατηρείται μείωση του ξηρού βάρους στο ανοιχτό σύστημα με βάρος ξηράς ουσίας περίπου 300 kg/στρ. σε αντίθεση με το κλειστό σύστημα στο οποίο το ξηρό βάρος είναι 346 kg/στρ.

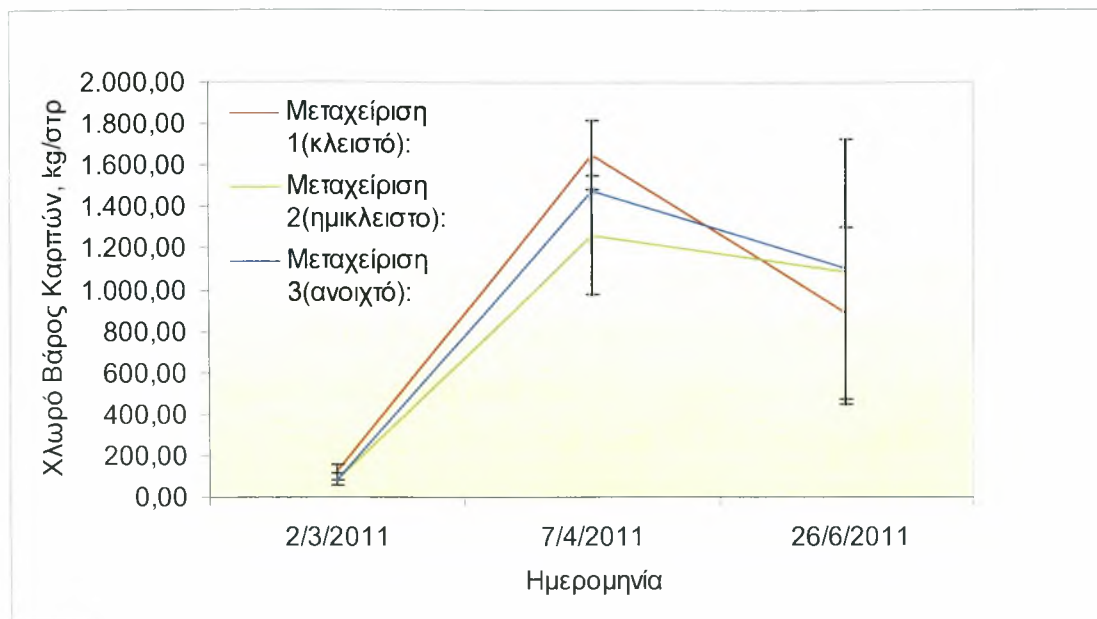
Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται το μέσο χλωρό βάρος καρπού των φυτών τομάτας και για τις τρεις μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.14. Μέσο χλωρό βάρος καρπού των φυτών από τις τρεις μεταχειρίσεις του συστήματος.

Όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα μεγαλύτερο μέσο χλωρό βάρος καρπού παρατηρείται στο ανοιχτό σύστημα με μέγιστη τιμή και για τις τρεις μετρήσεις περίπου τα 50 g. Στη συνέχεια ακολουθεί το κλειστό σύστημα με μέγιστη τιμή τα 42 g κατά τη δεύτερη καταστροφική μέτρηση και τέλος το ημικλειστό σύστημα με μέγιστη τα 40 g κατά τη τρίτη καταστροφική μέτρηση. Στο τέλος της περιόδου δηλαδή, το μικρότερο μέσο χλωρό βάρος καρπού παρουσίαζε το κλειστό σύστημα και το μεγαλύτερο το ανοιχτό.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το χλωρό βάρος των καρπών τομάτας και για τις τρεις μεταχειρίσεις.



Σχήμα 4.15. Χλωρό βάρος των καρπών των φυτών (kg/στρ) για τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το βάρος των καρπών για το κλειστό υδροπονικό σύστημα στη πρώτη και δεύτερη καταστροφική μέτρηση είναι αυξημένο σε σχέση με το ανοιχτό και ημικλειστό. Στη πρώτη μέτρηση το βάρος των καρπών ανά στρέμμα για το κλειστό σύστημα είναι 120 kg και στη δεύτερη 1650 kg, ενώ στο ανοιχτό σύστημα 80 kg και 1470 kg αντίστοιχα για τη πρώτη και δεύτερη μέτρηση. Κατά την εκτέλεση της τρίτης μέτρησης το βάρος των καρπών για το κλειστό σύστημα πέφτει σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα φτάνοντας τα 890 kg, ενώ στο ανοιχτό και ημικλειστό σύστημα το χλωρό βάρος των καρπών είναι 1100 kg και 1086 kg αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο ότι στο κλειστό σύστημα η συσσώρευση αλάτων στη ζώνη της ρίζας των φυτών εμποδίζει αυτά να προσλάβουν τα απαραίτητα στοιχεία και προκαλούνταν τροφοπενίες με αποτέλεσμα την μη κανονική ανάπτυξη των καρπών.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε με σκοπό να μελετηθεί η διαχείριση των απορροών σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας εφαρμόζοντας τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις στο σύστημα καλλιέργειας καθώς επίσης και την επίδραση των μεταχειρίσεων αυτών στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών της τομάτας.

Πιο αναλυτικά τα συστήματα αποτελούνταν από το ανοιχτό, ημίκλειστο και κλειστό υδροπονικό σύστημα και σε κάθε ένα από αυτά παίρνονταν οι μετρήσεις αύξησης και φωτοσύνθεσης όπως περιγράφηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Από την ανάλυση των μετρήσεων που ακολούθησε διαπιστώνεται ότι:

Η παραγωγή των φυτών της τομάτας ήταν μεγαλύτερη στο κλειστό υδροπονικό σύστημα σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα αλλά αυτό πραγματοποιούνταν μέχρι η συγκέντρωση των αλάτων στη ζώνη της ρίζας του φυτού φτάσει σε ένα ανώτερο όριο. Στη συνέχεια υψηλότερη παραγωγή πάρθηκε στο ημίκλειστο σύστημα και μικρότερη στο ανοιχτό. Όσον αφορά το ύψος των φυτών ήταν παρόμοιο και για τις τρεις μεταχειρίσεις χωρίς σημαντικές διαφορές. Απ' την άλλη, το βάρος των καρπών στο κλειστό σύστημα προς το τέλος της περιόδου μειώθηκε λόγω αύξησης της συγκέντρωσης των αλάτων στο περιβάλλον της ρίζας προκαλώντας τροφопενία Ca^{++} , με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανάπτυξη του μεγέθους των καρπών.

Η φυλλική επιφάνεια των φυτών όπως προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση δεν επηρεάζεται από τις τρεις μεταχειρίσεις του υδροπονικού συστήματος και γι' αυτό παρουσίαζαν παρόμοιες τιμές του δείκτη φυτλικής επιφάνειας (LAI).

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η αλατότητα δεν επηρέασε τη φωτοσύνθεση, τη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα των φύλλων και οποιαδήποτε αυξομείωση στις παραμέτρους που μετρήθηκαν ίσως να οφείλονται στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Συνοψίζοντας, πρέπει να αναφέρουμε ότι πράγματι το κλειστό σύστημα υδροπονίας συνέβαλε στην εξοικονόμηση νερού και θρεπτικών που οφείλεται στη μηδενική απόρριψη του θρεπτικού διαλύματος. Απ' την άλλη πλευρά το ανοιχτό σύστημα παρουσιάζει υψηλό κόστος λειτουργίας αφού το απορρέον θρεπτικό διάλυμα απορρίπτεται. Βέβαια, απαιτείται περεταίρω έρευνα για την εγκατάσταση ενός συστήματος το οποίο θα βασίζεται και θα συνδυάζει τις αρχές λειτουργίας του κλειστού

και ημίκλειστου συστήματος έτσι ώστε να εξοικονομούνται νερό και θρεπτικά αλλά ταυτόχρονα να αποφεύγονται προβλήματα συσσώρευσης αλάτων στο περιβάλλον της ρίζας με τα γνωστά αρνητικά αποτελέσματα στη παραγωγή και τη ποιότητα.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

1. ADC, 2004. LCpro+ Portable Photosynthesis System, Instruction Manual, ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, Herts, EN11 ODB, 84pp.
2. Savvas D., E. Chatzieustratiou, G. Pervolaraki, G. Gizas, N. Sigrimis, 2008. Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation. *Biosystems Engineering*, 99: 282-291.
3. D. Savvas, F. Lenz, 2000. Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield and composition of eggplants grown in rockwool. *Scientia Hort.* 84: 37-47.
4. D. Savvas, N. Mantzos, P.E. Barouchas, I.L. Tsirogiannis, C. Olympios, H.C. Passam, 2007. Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Scientia Hort.* 111: 311-318.
5. D. Savvas, E. Stamati, I.L. Tsirogiannis, N. Mantzos, P.E. Barouchas, N. Katsoulas, C. Kittas, 2007. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural Water Management* 91: 102-111.
6. H. Varlagas, D. Savvas, G. Mouzakis, C. Liotsos, I. Karapanos, N. Sigrimis, 2010. Modelling uptake of Na^+ and Cl^- by tomato in closed-cycle cultivation systems as influenced by irrigation water salinity. *Agricultural Water Management* 97: 1242-1250.
7. Harsharn S. Grewal, Basant Maheshwari, Sophie E. Parks, 2011. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agricultural Water Management* 98: 841-846.
8. D. Savvas, 2002. Automated Replenishment of Recycled Greenhouse Effluents with Individual Nutrients in Hydroponics by Means of Two Alternative Models. *Biosystems Engineering* 83: 225-236.
9. Bardossi A, Tongoni F, Incrocci L, Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Horticulturae*, 44/2, 28-34, 2004.
10. G. Carmassi, L. Incrocci, R. Maggini, F. Malorgio, F. Tognoni, A. Pardossi, 2007. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. *Agricultural Water Management* 88: 73-82.

11. J.J. Magan, M. Gallardo, R.B. Thompson, P. Lorenzo, 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management* 95: 1041-1055.
12. Ya Ling Li, Cecilia Stanghellini, 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89: 9-21.
13. Xu H.L, Gauthier L., Gosselin A., 1995. Effects of fertigation management on growth and fotosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. *Scientia Hort.* 63: 11-20.
14. Pieter A.C.M van de Sanden, Bob W. Veen, 1992. Effects of air humidity and nutrient solution concentration on growth, water potential and stomatal conductance of cucumber seedlings. *Scientia Horticulturae* 50: 173-186.
15. Sonneveld C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Thesis. University of Wageningen, Netherlands.
16. Schwartz D., Klaring H.P., van Iersel M.W., Ingram K.T. 2002. Growth and fotosynthetic response of tomato to nutrient solution concentration at two light levels. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 127(6): 984-990.
17. Chartzoulakis K., 1994. Photosynthesis, water relations and leaf growth of cucumber exposed to salt stress. *Scientia Hort.* 59: 27-35.
18. Lycoskoufis I.H., Savvas D., Mavrogianopoulos G., 2005. Growth, gas exchange and nutrient status in pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in recirculating nutrient solution as affected by salinity imposed to half of the root system. *Scientia Hort.* 106: 147-161.
19. D. Massa, L. Incrocci, R. Maggini, G. Carmassi, C.A. Campiotti, A. Pardossi, 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management* 97: 971-980.
20. Κίττας Κ., 2000. Θερμοκήπια. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 150.
21. Κίττα Ε., 2009. Επίδραση της σκίασης και της αλατότητας στις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
22. Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2005. Θερμοκήπια. Δ Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα.

23. Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2006. Υδροπονικές Εγκαταστάσεις. Β Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα.
24. Ολύμπιος Χ.Μ., 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα.
25. Κίττας Κ., Κατσούλας Ν., Μπαρτζάνας Θ., 2011. Δυνατότητες και προοπτικές εξάπλωσης θερμοκηπίων στην Ελλάδα. Εκδόσεις ΑγροΤύπος 10: 19-28, Αθήνα.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000111660